

ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА И СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТ

А. В. Павлов, Г. Ф. Гравис

Александр Владимирович Павлов, доктор географических наук, главный научный сотрудник Института криосферы Земли Сибирского отделения РАН (Тюмень). Руководитель проекта 98-05-64633.

Гунар Феликсович Гравис, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник того же института.

Первую публикацию статьи см.: Природа. 2000. №4. С. 10—18.

Как изменяется современный климат?

На исходе XX в. проблема глобального потепления климата не перестает волновать мировую общественность. В последние три-четыре года ее особенно остро прочувствовали жители средней полосы нашей страны. Здесь жаркие и сухие летние сезоны и мягкие зимы следовали друг за другом. Особенно запомнится современникам лето 1999 г. в Подмоскowie и других регионах Центральной России, сценарий которого развивался, как у М. Е. Салтыкова-Щедрина в городе Глупое во время правления градоначальника Фердыщенко, когда «с самого вешнего Николы, с той поры, как начала входить вода в межень, и вплоть до Ильина дня не выпало ни капли дождя. . . небо раскалилось. . . пахло гарью. . . травы и всходы огородных овощей поблекли. . . » Глуповцы видели причину возникшего несчастья в распутстве фердыщенковой любовницы Аленки. Не столь определены специалисты, владеющие арсеналом современных математических методов и быстро действующей компьютерной техникой. Большинство ученых связывает повышение температуры приземного слоя воздуха с все возрастающими промышленными выбросами в атмосферу диоксида углерода, метана и других газов, вызывающих парниковый эффект. Причинами изменений климата считают также смещение полюсов, озоновые дыры и даже... массированные натовские бомбардировки Ирака и Югославии.

Всего несколько лет назад ряд крупных климатологов прогнозировал повышение температуры воздуха на севере Евразии в начале XXI в. на 10—15°C. При таком резком потеплении были бы неизбежны резкий подъем уровня Мирового океана, сопровождаемый затоплением обширных низменных участков, таяние наземных и подземных льдов, освобождение газов (особенно метана), захороненных в вечной мерзлоте и их дополнительное поступление в атмосферу. Не случайно в газетах последних лет даже появились предостерегающие заголовки типа «Метановая бомба в вечной мерзлоте». К счастью для северян, предсказания значительных изменений климата в высоких широтах пока не оправдываются. Но что можно ожидать в будущем?

Известно, что климат постоянно претерпевает естественные изменения. В 1625 г. сэр Фрэнсис Бэкон обратил внимание на то, что кроме суточных и сезонных вариаций метеорологических элементов существуют многолетние их циклы. В 1957 г. Дж. К. Чарлсуэрт уже выявил около 150 таких циклов различной продолжительности. В 70х годах А. С. Монин и Ю. А. Шишков выделяли многочисленные циклы с периодом от миллиарда до десятков лет [1]. Хорошо известны короткопериодные колебания метеорологических элементов: 5—6-летние, 9—14-летние и др. Все циклы, накладываясь друг на друга, создают сложный интегральный ход изменения метеорологических элементов. В последние два-три десятилетия на естественные климатические циклы все заметнее влияют колебания, связанные с антропогенным воздействием.

При изучении многолетних изменений современного климата, чтобы исключить случайные вариации усредняют метеорологические данные за промежуток времени, чаще всего за десять лет. Анализ таких «скользящих» значений для температуры воздуха выполнен по ряду стран Северного полушария — Россия, Канада, США (Аляска), Китай, — и он показал, что в большинстве континентальных районов за период инструментальных метеорологических наблюдений в целом действительно отмечается заметное повышение температуры воздуха (до 2,4°C в Якутске за 1830—1995 гг.). Однако в районах, примыкающих к северным морям, прирост температуры воздуха за все время метеорологических измерений, несмотря на ее колебания в отдельные годы, практически отсутствует. Это дает основание полагать, что в Арктике и некоторых смежных регионах из-за близости морей и слабого техногенного воздействия современные потепления - похолодания не выходят за пределы естественной вековой цикличности климата [2].

Можно выделить два периода с отчетливо выраженным повышением температуры воздуха на севере: с конца XIX в. по 40-е годы XX в. (этот период называют «потеплением Арктики») и с середины 60-х годов до настоящего времени (рис. 1). Последнее потепление пока не достигает размеров первого. Более того, в начале 90-х годов на ряде арктических метеостанций наблюдалось заметное похолодание. Однако последующие годы оказались достаточно теплыми, что явилось причиной сохранения общей тенденции потепления климата в наши дни.

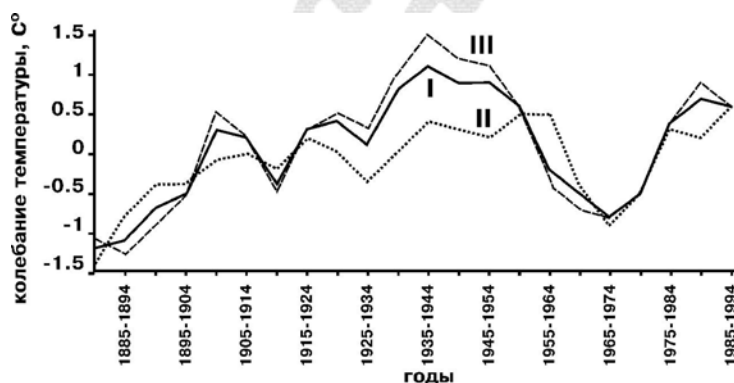


Рис. 1. Временной ход среднегодовой (I), среднелетней (II) и среднезимней (III) температуры воздуха в Салехарде (север Западной Сибири). Приведены усредненные по 10летним интервалам отклонения температуры от среднего значения за весь период наблюдений (ноль на вертикальной шкале).

Среднегодовая температура воздуха на севере России за 1965—1995 гг. увеличилась на различных метеостанциях от 0,4 до 1,8°C. Тренд этих значений в указанные 30 лет составляет 0,02—0,03°C/год в условиях Европейского Севера, 0,03—0,07 — на севере Западной Сибири и 0,01—0,08°C/год — в Якутии. При этом потепление обусловлено главным образом повышением зимней температуры воздуха. Продержится ли эта тенденция или сменится другой? Этот вопрос должен интересовать нас особо — более 65% огромной территории России занято вечной мерзлотой, которая чутко реагирует на малейшие изменения климата и поэтому отнюдь не является вечной.

Эволюция мерзлоты и народное хозяйство

Скованные льдом горные породы встречаются на севере Европейской России, Урала, севере Западной Сибири (примерно до широтного отрезка Оби), на большей части Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока (рис. 2, 3). Отрицательные температуры проникают в землю до глубины 1300—1500 м, минимальные их среднегодовые значения достигают -16°C. Вечномерзлый покров литосферы в плане выглядит так: вдоль верхнего (северного) края карты России он почти сплошной, с редкими дырами и прорезями в виде таликов под крупными озерами и реками, мощность мерзлоты здесь максимальна, а температура минимальна. К югу становится все больше таликовых прорех, толщина мерзлоты уменьшается, температура ее по-

вышается, и у нижнего, южного края области вечной мерзлоты от сплошного покрова остаются одни лоскутки — острова мерзлых пород мощностью в несколько метров или десятков метров с температурой, близкой к нулю [3].



Рис. 2. Полигонально-валиковый рельеф свидетельствует о наличии залегающих жильных льдов в горных породах. Полуостров Ямал.



Рис. 3. Классический ледовый разрез Мамонтова гора на левобережье р. Алдан (Центральная Якутия). Фото А. В. Павлова

Северный край страны населен крайне скудно. На огромных просторах арктических холодных пустынь, тундры, лесотундры, тайги и горных степей, на равнинах, плоскогорьях и в горах на 1 км² территории приходится менее одного человека. В Ямало-Ненецком национальном округе этот показатель равен 0,6 чел. /км², в Корякии и на Чукотке — 0,1—0,2, а в Эвенкии и на Таймыре и вовсе 0,03—0,06 чел. /км².

Тем не менее, хозяйственное значение области вечной мерзлоты, или криолитозоны, как ее называют мерзлотоведы, трудно переоценить. Она, по сути, стратегический тыл экономики России, ее топливно-энергетическая база и валютный цех. Это — более 30% разведанных запасов всей нефти страны, около 60% природного газа, неисчислимы залежи каменного угля и торфа, большая часть гидроэнергоресурсов, запасов цветных металлов, золота и алмазов, огромные запасы древесины и пресной воды. Значительная часть природных богатств уже вовлечена в хозяйственный оборот. Создана дорогостоящая и уязвимая инфраструктура: нефтегазопромысловые объекты, магистральные нефте и газопроводы протяженностью в тысячи километров, шахты и карьеры, гидроэлектростанции, возведены города и поселки, построены автомобильные и железные дороги, аэродромы и порты. На вечной мерзлоте стоят Магадан, Анадырь, Якутск, Мирный, Норильск, Игарка, Надым, Воркута, даже в границах Читы имеются острова вечной мерзлоты. В настоящее время хорошо разработаны методы прогнозирования последствий строительства на вечной мерзлоте. Однако трудно предсказуемые изменения климата меняют мерзлотные условия гораздо сильнее.

Быстрое оттаивание мерзлых пород может обернуться катастрофически ми последствиями. Верхние горизонты вечномерзлых пород (мощностью от 2 до 50 м, а иногда и более) содержат лед в виде мелких линзочек и жилок, а также клиновидной (полигональной в плане) решетки или пластовых залежей мощностью до 30—40 м. На некоторых участках северных равнин лед составляет до 90% объема мерзлых пород. По оценкам Б. И. Втюрина, запасы подземных льдов криолитозоны России составляют 19 тыс. км³, что дает право иногда называть вечную мерзлоту подземным оледенением [4].

Оттаивание насыщенных льдом пород из-за потепления климата будет сопровождаться просадками земной поверхности и развитием опасных мерзлотных геологических процессов — термокарста, термоэрозии, солифлюкции. Начнется массовое разрушение зданий и инже-

нерных сооружений, построенных на мерзлом грунтовом основании. Такие последствия потепления климата могут стать разорительными для экономики.

Ключ к прогнозу мерзлотно-климатических изменений

Мерзловеды в состоянии количественно оценить грядущие изменения вечной мерзлоты на любой срок, но только в том случае, если достоверно известны исходные метеорологические параметры. Загвоздка в том, что долго срочные метеорологические прогнозы далеки от совершенства, их достоверность и оправдываемость оставляют желать лучшего. В итоге на основе разноречивых прогнозов климата получаются различные мерзлотные прогнозы.

Существуют сценарии значительного и умеренного потепления климата в области вечной мерзлоты в XXI в., имеется даже вариант похолодания. Так, по расчетам М. К. Гавриловой [5], к середине грядущего столетия среднегодовая температура воздуха в Сибири и на Дальнем Востоке повысится на 4—10°C, вследствие чего вечная мерзлота будет оттаивать и со временем сохранится только в высоких горах и на равнинах севера Восточной Сибири и Дальнего Востока. О. А. Анисимов и Ф. Э. Нельсон считают, что увеличение глобальной температуры воздуха на 2°C приведет к полному оттаиванию мерзлых пород на 15—20% территории криолитозоны [6]. Однако, как мы уже отмечали, метеорологические данные за последние 10—15 лет показывают, что экстремальные сценарии изменения климата не оправдываются, потепление идет, но более скромными темпами.

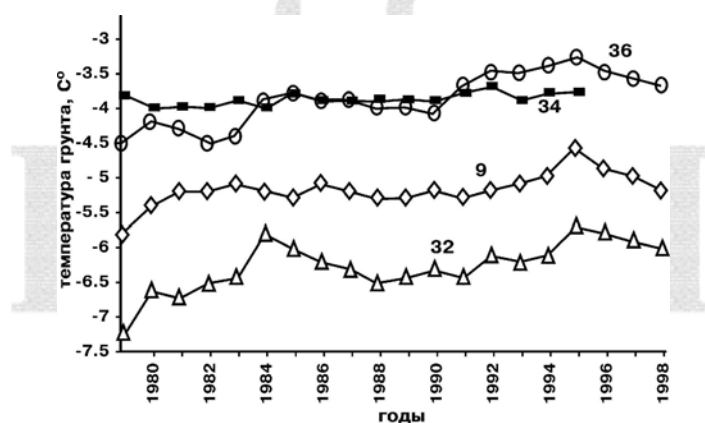


Рис. 4. Вариации среднегодовой температуры вечномерзлых грунтов на глубине 10 м на стационаре Марре Сале за 1979—1998 гг. Экспериментальные площадки: 9 — западный склон, 32 — полигональная тундра, 34 — полоса стока, 36 — днище спущенного озера.

Прогнозы умеренного потепления климата в значительной мере основываются на анализе современных трендов метеорологических характеристик и их продлении на ближайшее будущее. Чем продолжительнее ряды и больше число пунктов наблюдений, тем больше уверенности в правильности прогноза. Если тенденция к потеплению сохранится в первой половине XXI в., можно ожидать повышения среднегодовой температуры воздуха к 2020 г. на 0,9—1,5°C и к 2050 г. на 2,5—3°C. Атмосферные осадки к этому времени возрастут на 5 и 10—15% соответственно.

Продолжительность метеорологических измерений в нашей стране превышает 180 лет. До недавнего времени сеть метеостанций в России, и в частности на ее севере, была достаточно разветвленной. Однако в 90-х годах она резко сократилась, что неизбежно ведет к ухудшению достоверности климатических прогнозов.

При обосновании сценариев умеренного потепления климата помимо данных метеостанций используют результаты наблюдений на геокриологических (мерзлотных) стационарах, где кроме метеорологических элементов измеряют характеристики теплового режима грунтов, и в частности глубину сезонного промерзания и протаивания, исследуют мерзлотные процессы. Та кое сочетание повышает достоверность прогнозов, хотя в России, а тем более в

зарубежных странах, продолжительность наблюдений на подобных стационарах — опорных пунктах мониторинга криолитозоны — намного меньше, чем на метеостанциях, и за редким исключением не превышает 25—30 лет. Стационарные геокриологические наблюдения проводились в наибольшем объеме на северо-востоке Европы, севере Западной Сибири, в Центральной Якутии и на юге Сибири. К началу 90-х годов сеть наблюдений за состоянием криолитозоны России насчитывала более 30 стационаров постоянного действия. К сожалению, в последние годы и их число резко сократилось.

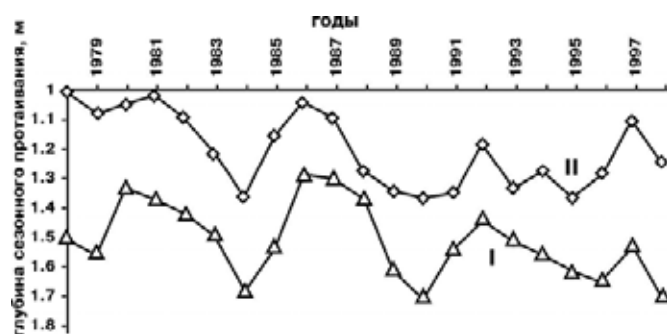


Рис. 5. Вариации глубины максимального сезонного протаивания грунтов на стационаре Марре Сале (Западный Ямал) за 1978—1998 гг. Экспериментальные площадки: I — полигональная тундра, II — песчаный раздуд на участке полигональной тундры.

Анализ полученных на таких стационарах данных свидетельствует о широко распространенной деградации верхних горизонтов криолитозоны (повышении температуры вечномерзлых пород, уменьшении их площади, возрастании глубины сезонного протаивания) за последние 15—25 лет. При этом повышение температуры мерзлоты может быть вызвано как потеплением климата, так и возрастанием снегоотложений.

В качестве наглядного примера происходящих термических изменений в криолитозоне воспользуемся данными наблюдений стационара Марре Сале (Западный Ямал), расположенного на участке одноименной метеостанции (рис. 4, 5). Здесь почти на всех экспериментальных площадках температура мерзлых пород на глубине 10 м за 1979—1998 гг. повысилась на 0,1—1°С. Только в полосе поверхностного стока воды температура пород за это время практически не изменилась. Геотермические исследования в Сибири показали, что современное потепление пород достигает глубин в десятки метров. Прогнозируемые нами региональные повышения температуры поверхности пород не превысят здесь 1,4°С к 2020 (2025) и 2,3°С к 2050 г. (см. табл.).

По наблюдениям на том же стационаре, глубина сезонного протаивания в целом слабо возрастала за 1978—1998 гг., несмотря на ее большие между годовые вариации. К 2020 г. она увеличится на Севере всего на 15—20 см в песках, а в супесях, глинах и торфах еще меньше.

Вечная мерзлота в 2025 и 2050 годах

Если оправдаются приведенные выше прогнозные оценки умеренного (а тем более резкого) потепления климата в северных районах, то к середине нового столетия облик вечной мерзлоты в России существенно изменится.

Сопоставление современных характеристик вечной мерзлоты с прогнозными проводилось путем составления последовательного ряда мелкомасштабных карт криолитозоны. Помимо сугубо мерзлотных характеристик (распространения вечномерзлых пород, их мощности, температуры, льдистости, глубины сезонного протаивания) для оценки возможных изменений вечной мерзлоты приходится учитывать состав горных пород, а также рельеф и весь комплекс ландшафтных условий.

Таблица
Ожидаемое повышение температуры поверхности грунтов в XXI в. на территории криолитозоны России, °С

Регион	2020 (2025) г.			2050 г.		
	Тундра	Лесотундра	Тайга	Тундра	Лесотундра	Тайга
Европейский Север	0.8	—	—	1.5	—	—
Западная Сибирь	1.1	1.0	0.9	2.0	1.8	1.7
Якутия	1.4	1.0	0.8	2.3	1.8	1.6
Северо-Восток	—	0.6	0.5	—	1.1	0.9
среднее	1.1	0.9	0.7	1.9	1.6	1.4

Эта работа была начата во ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии и продолжена в Институте криосферы Земли СО РАН под руководством Е. С. Мельникова. На основе ландшафтной карты России была составлена карта криогенных геологических процессов [7], преобразованная в прогнозную. С использованием последней построена картографическая схема изменений вечной мерзлоты.

На схеме, приведенной в статье (рис. 6), показаны четыре зоны. Первую образуют территории, не входящие в состав современной области вечной мерзлоты. Здесь имеет место только ежегодное локальное или повсеместное сезонное промерзание почв до глубин не более 4—5 м. К середине XXI в. глубина и площади распространения сезонного промерзания сократятся.

Три остальные зоны охватывают современную область вечной мерзлоты и отличаются друг от друга разной степенью и сроками начала повсеместного глубокого оттаивания вечномерзлых пород сверху. За его начало принят момент, когда слой грунтов, оттаявший за лето, следующей зимой промерзает не полностью и кровля многолетнемерзлых пород начинает прогрессивно понижаться. Временной интервал, за который такие породы оттают полностью, зависит не только от потепления климата, но и от состава и льдистости пород, их температуры и мощности, от притока тепла снизу — из глубин Земли. Это таяние может длиться годами, десятилетиями, сотнями и тысячами лет.

Вторая с юга зона — это территории, на которых вечная мерзлота к 2020 г. будет повсеместно оттаивать. Она сформируется только в пределах Западно-Сибирской низменности. В настоящее время здесь встречаются только редкие острова — линзы вечномерзлых пород с температурой выше $-0,5^{\circ}\text{C}$, приуроченные к торфяникам. После их оттаивания южная граница мерзлоты отступит к северу на 300 км и более, таяние вспученных льдом торфяников будет сопровождаться интенсивными просадками поверхности, но серьезных изменений в природную обстановку и деятельность человека это не внесет: вечномерзлые торфяники встречаются редко и в хозяйственное освоение практически не вовлечены.

Третья зона объединяет две подзоны, границы, между которыми весьма прихотливы и на нашей схеме не показаны. В первую (с юга) входят территории, где вечномерзлые породы начнут таять повсеместно только к 2050 г. Здесь в настоящее время встречаются острова и небольшие массивы вечно мерзлых пород, развитые в самых неудобных для человека урочищах — в торфяниках, на сильно замшелых участках тайги, в затененных узких и глубоких долинах, на горных склонах северной экспозиции. Температура этих пород не ниже -1°C . Ширина подзоны на севере европейской части России достигает 50—100 км, в Западной Сибири — 100—250 км, а на юге Среднесибирского плоскогорья — даже 600 км. В горах сокращение площадей, занятых вечномерзлыми породами, будет минимальным: к 2050 г. повсеместно таять они будут только на Енисейском кряже и в небольшой части гор Южной Сибири и Юго-восточного Забайкалья.

Во вторую подзону включены территории, где к 2050 г. глубокое оттаивание вечномерзлых пород будет происходить не везде. Современная температура вечномерзлых пород здесь меняется в основном в пределах от -1 до -5°C . Это преимущественно пески и скальные породы. Ширина подзоны локального оттаивания вечномерзлых пород на севере европейской час-

ти России достигнет 30—100 км, на севере Западной Сибири — 40—200 км, в Восточной Сибири — 240—820 км. Подзона включает в себя также часть низких гор Южной Сибири, Забайкалья, юга Дальнего Востока и Камчатки до 60—62° с. ш.

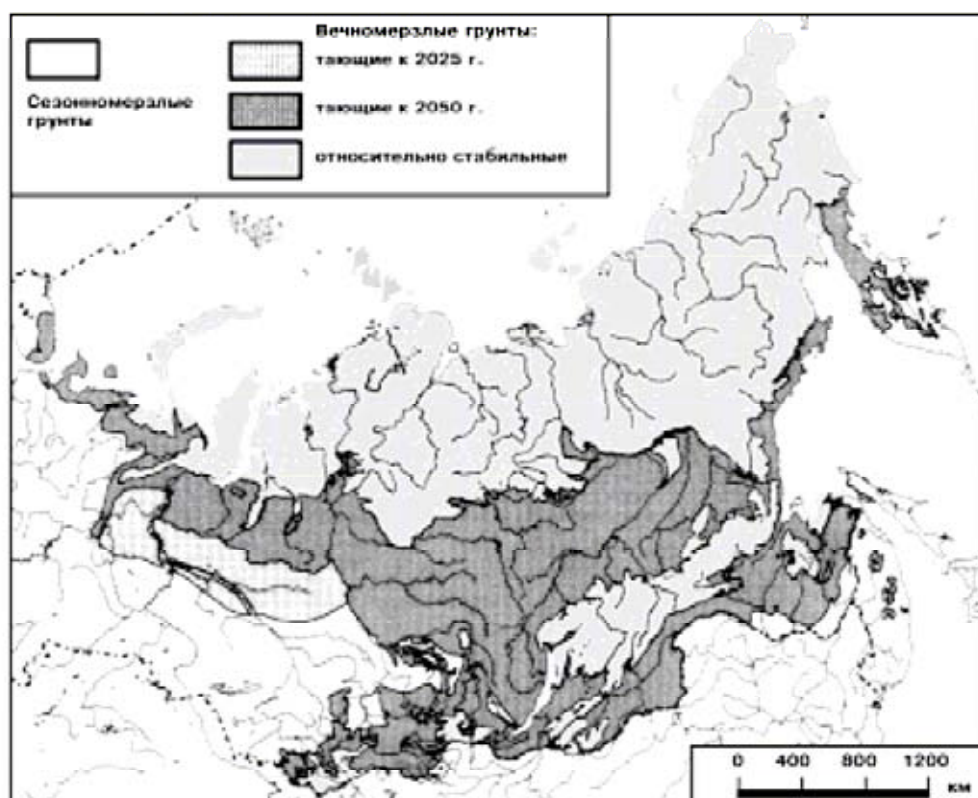


Рис. 6. Ожидаемая эволюция криолитозоны в России при умеренном прогнозе потепления климата к 2020 и 2050 гг.

В четвертую зону относительно стабильных вечномёрзлых пород входит северная часть криолитозоны с самыми низкими температурами по род — от -3 до -16°C . Мощность их измеряется сотнями метров. При прогнозных масштабах потепления климата глубокое протаивание вечномёрзлых пород на этой территории исключается. Незначительно увеличится лишь площадь таликов.

Таким образом, к середине XXI в. (всего за 50 лет) температура поверхности грунтов в пределах криолитозоны России может повыситься на $0,9$ — $2,3^{\circ}\text{C}$, а глубина сезонного протаивания — на 15—33%. Из-за этого южная граница мерзлоты на равнинах и плоскогорьях отступит к северу и северо-востоку на 50—600 км. Если к зоне и подзоне повсеместного оттаивания вечномёрзлых пород добавить подзону локального их таяния, то в целом мы по лучим полюсу деградации вечной мерзлоты, ширина которой на севере европейской части России достигает 50—200 км, в Западной Сибири — 800 км и в Восточной Сибири — 1500 км. Сильно сократятся, но полностью не исчезнут острова и массивы вечномёрзлых пород в горах Забайкалья, на юге Дальнего Востока и на Камчатке.

Ожидаемое к середине XXI в. потепление климата и криолитозоны сопоставимо с потеплением в период голоценового климатического оптимума 8—4,6 тыс. лет назад. На территориях, где вечная мерзлота сохранялась, возрастала глубина сезонного протаивания. Анализ строения верхнего горизонта вечномёрзлых пород позволяет установить глубину сезонного протаивания в то время. В арктических и высокогорных районах она оказалась на 20—40% больше современной, т. е. сопоставимой с прогнозируемой величиной прироста мощности сезонно талого слоя к 2050 г. Такое совпадение лишней раз подтверждает реальность предложенного сценария.

Негативные последствия потепления климата, видимо, будут усугубляться одновременным увеличением количества осадков. Хотя тенденции изменения прослеживаются с трудом,

отмечено, что за последнее тысячелетие в периоды потепления пути движения циклонов с запада на восток смещались к северу, что вызывало увеличение осадков в высоких широтах и уменьшение их в низких [8]. Многочисленные палеогеографические исследования также показывают, что в течение плейстоцена и голоцена потепления в высоких широтах сопровождались увеличением влажности климата. Можно предположить, что на большей части криолитозоны России ожидаемое потепление XXI в. будет также сопровождаться увеличением количества осадков. Это общее предположение подтверждается результатами анализа современных трендов метеорологических характеристик, которые свидетельствуют о 10—15-процентном увеличении атмосферных осадков к 2050 г.

Зимние осадки будут способствовать повышению температуры вечно мерзлых пород, а летние — приводить к их разрушению из-за усиления термокарста, термоэрозии, термоабразии, а также солифлюкционно-оползневых процессов. Наиболее ярко они проявятся на аккумулятивных равнинах, сложенных высокольдистыми породами, т. е. там, где вечномерзлые толщи из-за своих низких температур и большой мощности останутся в целом стабильными. При разрушении верхнего льдистого горизонта поверхность деформируется существенно и, если своевременно не будут приняты защитные меры, нависнет угроза над инженерными сооружениями.

* * *

Итак, последствия потепления климата будут отмечаться на большей части территории криолитозоны России. К тому же возрастет антропогенное воздействие на мерзлоту. В результате усилятся влагооборот грунтовых вод, сместятся границы ландшафтных зон, нарушится устойчивость поверхности, могут произойти массовые аварии на геотехнических комплексах. Необходима система защитных мероприятий, учитывающая климатические изменения и масштабы деградации криолитозоны. Еще в 80х годах начались интенсивные разработки системы строительно-профилактических методов и инженерных мер, чтобы защитить геотехнические системы Севера от разрушения.

Традиционные способы обеспечения надежности строительства за счет усиления конструкций фундаментов и увеличения их заглубления в значительной мере себя исчерпали, особенно на высокотемпературных льдистых пластичных грунтах. При потеплении окажутся недостаточно эффективными и слишком дорогостоящими вентилируемые подполья.

Обеспечить устойчивость сооружений в условиях деградации криолитозоны можно, искусственно охлаждая грунтовое основание, предварительно глубоко оттаивая мерзлые грунты, используя принципиально новые конструкции фундаментов [9].

Назрела необходимость в разработке научных основ и практических способов, чтобы целенаправленно контролировать и регулировать мерзлотный режим грунтовых оснований. Нуждаются в пересмотре нормативы для проектирования фундаментов новых капитальных зданий и сооружений, необходимы поиски новых подходов к обеспечению их устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Монин А. С., Шишков Ю. А. *История климата*. Л.: Гидрометеиздат, 1979.
- 2 Павлов А. В. *Закономерности формирования криолитозоны при современных изменениях климата* // Изв. РАН. Серия геогр. 1997. №4. С. 61—73.
- 3 *Общее мерзлотоведение (геокриология)* / Под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1978.
- 4 Втюрин Б. И. *Подземные льды СССР*. М.: Наука, 1975.
- 5 Gavrilova M. K. *Climate and Permafrost* // *Permafrost and Pariglacial processes*. 1993. №2 (4). P. 99—111.
- 6 Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э. *Прогноз изменений мерзлотных условий в Северном полушарии: применение результатов балансовых и транзитивных расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы* // *Криосфера Земли*. 1998. №2. С. 53—57.

- 7 Мельников Е. С., Гравис Г. Ф., Конченко Л. А., Молчанова Л. С. Карта криогенных геологических процессов криолитозоны России (масштаб 1:7 500 000) // Итоги фундам. исслед. Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 279—286.
- 8 Ле Руа Л. Э. История климата с 1000 года. Л.: Гидрометеоиздат, 1971.
- 9 Мельников П. И., Каменский Р. М., Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны // Вестн. РАН. 1993. С. 1090—1095.

