НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 61–68 **http://www.izdatgeo.ru**

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 551.345:536 (571.5)

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРИ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА И ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ПРИРОДУ

И.Е. Трофимова, С.А. Макаров, А.С. Балыбина, М.Ю. Опекунова

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, а/я 4027, Россия, balybina@irigs.irk.ru, makarov@irigs.irk.ru

По многолетним материалам метеорологических станций дана оценка мерзлотно-термического режима почвенной толщи 3,2 м на территории южной части Сибирской платформы. Выделены его типы для летнего и зимнего периодов года. Изучены региональные особенности реакции температуры почвы на современные изменения климата. Отмечено, что за период 1964–2000 гг. рост летних температур обычно превышает рост зимних температур почвы, а климатические колебания температуры достигают глубины 3,2 м. Представлена схема распространения участков развития многолетнемерзлых грунтов по трассе газопровода Ковыкта–Жигалово. Дан качественный прогноз поведения высокотемпературных многолетнемерзлых пород в условиях техногенеза. Рекомендованы мероприятия для минимизации воздействия криогенных процессов.

Изменение климата, температура почвы, снежный покров, многолетняя мерзлота, криогенные процессы

GEOCRYOLOGICAL RISKS UNDER CONTEMPORARY CLIMATE CHANGES AND ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE ENVIRONMENT

I.E. Trofimova, S.A. Makarov, A.S. Balybina, M.Yu. Opekunova

V.B. Sochava Institute of Geography, SB RAS,
664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 1, P/O box 4027, Russia, balybina@irigs.irk.ru, makarov@irigs.irk.ru

Long-term observation data from meteorological stations have been used to assess the permafrost-thermal regime of the 3.2 m thick soil layer on the territory of the southern part of the Siberian platform. The types of this regime have been marked out for summer and winter seasons. The regional characteristics of the soil temperature response to contemporary climate changes have been examined. It has been pointed out that during the period 1964–2000, the increase of summer soil temperatures exceeded the increase of winter temperatures, and that the depth of climatic variations of the temperature reached 3.2 m. The schematic map of the distribution of the permafrost areas along the Kovykta–Zhigalovo gas pipeline route has been presented. A qualitative forecast of the behavior of high-temperature permafrost in the technogeneous conditions has been provided. Measures for the minimization of the effects of the cryogenic processes are recommended.

Climate change, soil temperature, snow cover, permafrost, cryogenic processes

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В многочисленных публикациях зарубежных и отечественных ученых отмечается, что в XX в. наблюдалось глобальное потепление климата. Между тем существует некоторая противоречивость в оценке вклада в изменение климата антропогенной (парниковый эффект атмосферы) и природной составляющих. Достаточно обоснованы результаты исследований, свидетельствующие о природном характере глобального потепления климата. При этом не исключается наложение на природные процессы антропогенной составляющей [*Дучков, Балобаев, 2001; Кляшторин, Любушин, 2006*].

На территории России потепление климата зафиксировано с середины 1960-х гг. В среднем за 100-летие (1901–2000) повышение температуры воздуха составило 0,9 °С [*Груза, Ранькова, 2004*]. Существенный вклад в величину линейного тренда привнесли крупные климатические аномалии последнего десятилетия XX в. В то же время на огромных российских просторах изменения климата происходили с разной интенсивностью и на-

© И.Е. Трофимова, С.А. Макаров, А.С. Балыбина, М.Ю. Опекунова, 2010

правленностью. По результатам анализа временных рядов (1955–1998 гг.) среднегодовой температуры воздуха на территории Сибири и Дальнего Востока установлено повсеместное потепление. Обширные очаги наибольших значений трендов зафиксированы в центре Сибири [*Ипполитов и др., 2004*]. Вместе с тем отмечено, что со второй половины 1990-х гг. темпы потепления климата заметно снизились, особенно на Европейском севере и севере Западной Сибири, но возросла его изменчивость [*Мельников и др., 2007*].

В настоящее время нет однозначного реального прогноза для температуры воздуха. Однако происходящие с экстремальными проявлениями современные вариации климата и его прогнозируемое потепление на территории России в XXI в., рассчитанное с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана (CMIP3) и сценария увеличения содержания парниковых газов и аэрозоля (A2) [*Мелешко и др., 2008*], определяют необходимость анализа воздействия глобального потепления на самые чувствительные к колебаниям климата компоненты природной системы.

Роль ключа к пониманию последствий изменения климата играет изучение поведения криосферы Земли (снега, льда, многолетней и сезонной мерзлоты). Достаточно полное представление о реакции температуры мерзлых пород на современные климатические изменения можно получить из анализа результатов мониторинга, проводимого в России на геокриологических стационарах, расположенных на Европейском северо-востоке, севере Западной Сибири и в Центральной Якутии. Экспериментальные стационары в этих регионах считаются эталонными в рамках действующего мониторинга криолитозоны России [*Павлов, 1992, 1996, 2008*]. Из обзора многочисленных работ по данной проблеме сделан вывод, что термическое состояние многолетней мерзлоты не всегда адекватно реагирует на современное потепление климата. Характер отклика зависит от физико-географических и ландшафтных условий территории, определяющих этот процесс, и существенно изменяется при техногенных воздействиях на земную поверхность [*Мельников и др., 2007*].

Вместе с тем в условиях изменения климата важна оценка поведения не только температуры мерзлых пород, но и сезоннопромерзающих почв. По совокупной информации геокриологических стационаров и метеорологических станций (в основном северных районов России) систематизация сведений о формировании трендов изменений температуры верхних горизонтов криолитозоны (почв, грунтов) в период современного потепления климата дана в работе А.В. Павлова [*2008*]. Однако широко использовать информацию по температуре почвенной толщи до глубины 3,2 м, получаемой на метеорологических станциях России, начали позднее [*Васильев, 1999; Гиличинский и др., 2000; Чудинова и др., 2003; Трофимова 2006, 2007, 2008; Шерстюков, 2008*]. Между тем, являясь продуктом воздействия внешних (климата атмосферы, наземного покрова и др.) и внутренних (свойств самой почвы) факторов, термический режим почв можно считать интегральным критерием поведения природных систем.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Оценка взаимообусловленности температурного режима почвенной толщи 3,2 м, температуры воздуха и мощности снежного покрова по данным инструментальных наблюдений (1965–2004 гг.) на большом количестве метеорологических станций выполнена для всей территории России [*Шерстюков, 2008*]. Однако научные интересы и запросы практики в условиях инженерно-технического воздействия на природную среду требуют проведения подобных исследований дополнительно и на региональном уровне, и даже на локальном уровне. Подходы к использованию имеющейся базы данных метеорологических параметров и температуры почвы и в том и в другом случаях близки.

Анализ особенностей термического режима почвенной толщи 3,2 м и его реакции на современное потепление климата нами выполнен на территории южной части Сибирской платформы. Эта территория интересна для исследования с нескольких позиций. Во-первых, она сложна по структуре почвенного покрова [*Кузьмин, 2002*]. Во-вторых, на фоне сезоннопромерзающих почв здесь зафиксированы острова высокотемпературной многолетней мерзлоты [*Лещиков, Шац, 1983*]. В-третьих, изучаемый регион богат минерально-сырьевыми ресурсами и в настоящее время активно осваивается, что приводит к техногенным нарушениям земной поверхности, которые могут более активно воздействовать на термический режим мерзлых толщ и сезоннопромерзающих почв, чем современные изменения климата. В рассматриваемом регионе сочетание климатических изменений и техногенной (трубопроводы) нагрузки на ландшафты предопределили напряженную экологическую обстановку. При этом речь может идти в первую очередь о геокриологическом риске освоения территории, т. е. заранее оцениваемой вероятности возникновения опасных геокриологических явлений, нарушающих или разрушающих природные системы (ландшафты), а также создающих непосредственную опасность для линейных сооружений. Однако, выделяя частные риски (геокриологический, климатический, геохимический, геоморфологический и др.) из концепции “экологический риск”, “важно подчеркнуть, что такие

специализированные понятия риска приводят к усложнению структуры и содержания риска, его переосмыслению в терминах специальных отраслевых наук" [*Михеев, 1998, с. 3*].

На рассматриваемой территории имеется несколько метеорологических станций, на которых выполняются режимные наблюдения за температурой почвы по вытяжным термометрам. Присутствие многолетней мерзлоты на площадках метеостанций не зафиксировано. Однако некоторые из них находятся вблизи небольших ареалов высокотемпературной многолетней мерзлоты.

Для воспроизведения полной картины термического состояния почв всего ландшафтного разнообразия рассматриваемой территории полученной на метеостанциях информации недостаточно. Поэтому приведенные ниже результаты носят в определенной степени оценочный характер возможностей почвы преобразовывать, аккумулировать и расходовать ресурсы атмосферного климата на конкретной территории. В то же время характеристики мерзлотно-термического режима почв "обезлесенных" площадок метеостанций могут быть использованы как точка отсчета в определениях техногенного воздействия на природную среду в условиях нарушения (удаления) растительного покрова.

Основу анализа временных рядов температуры почвы на всех стандартных глубинах почвенного профиля могут составлять среднегодовые, среднемесячные значения [*Гиличинский и др., 2000*], средние температуры за период трех самых теплых месяцев и трех самых холодных [*Шерстюков, 2008*]. Нами используются интегральные показатели аккумуляции тепла и холода в почвенном профиле, к которым относятся значения соответственно самой высокой и самой низкой среднемесячных температур (с учетом запаздывания с глубиной) в годовом цикле [*Трофимова, 2006*]. Поскольку в течение года моменты наступления самой высокой и самой низкой температур отличаются нестабильностью, их выборка проводится для каждого конкретного года многолетнего ряда.

В зависимости от целевого назначения исследований можно ограничиться оценкой отклика температуры почвы на изменения атмосферного климата на конкретных глубинах. Например, глубина 1,6 м оптимальна для установления общих закономерностей отклика температуры почвы на долговременные климатические изменения [*Трофимова, 2008*]. При геокриологической оценке территорий особенно важна реакция на современные климатические изменения температуры самого нижнего, доступного для измерений на метеостанциях, слоя почвенной толщи. Тем более, как показали исследования [*Чудинова и др., 2003*], достоверность линейных трендов изменений температуры почвы с глубиной возрастает.

Для оценки средней многолетней температуры почвы и ее динамики на территории южной части Сибирской платформы привлечена информация за один и тот же период (1964–2000 гг.) для всех метеостанций. Учитывая, что существенный вклад в теплообменные процессы в почвах вносит снежный покров, нами использовались многолетние ряды высоты снега в период его максимального накопления (конец февраля–начало марта). Привлекалась дополнительная информация: мощность слоя сезонного промерзания–протаивания, длительность сохранения отрицательной температуры в почвенном профиле, экспериментальные наблюдения за поведением многолетней мерзлоты в условиях техногенного нарушения земной поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мерзлотно-термический режим почвенной толщи

Закономерности вертикального распределения температуры в почвенной толще на протяжении года в целом являются общими для всей рассматриваемой территории. Для оценки многолетнего (1964–2000 гг.) мерзлотно-термического режима почв построены вертикальные профили самой высокой и самой низкой в годовом цикле среднемесячной температуры (рис. 1). Следует отметить, что распределение самой низкой температуры по профилю почвы отличается хорошо выраженными общими закономерностями, соответствующими радиационному типу, когда значения

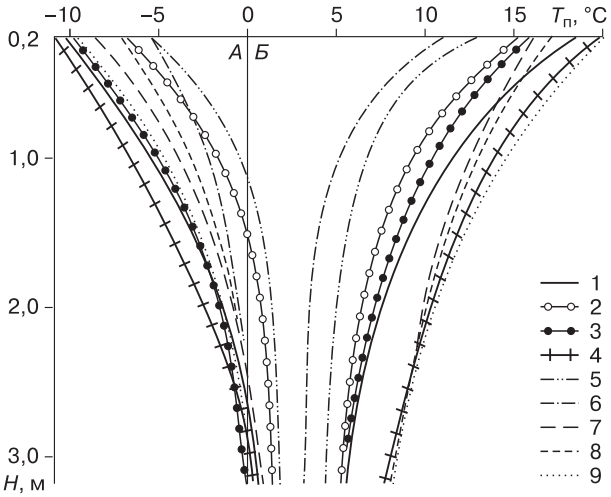

Рис. 1. Характер распределения самой низкой (*А*) и самой высокой (*Б*) среднемесячных температур по почвенному профилю.

Метеостанции: 1 – Балаганск, 2 – Коченга, 3 – Лукиново, 4 – Жигалово, 5 – Орлинга, 6 – Тырка, 7 – Карам, 8 – Казачинское, 9 – Киренск.

температуры с глубиной последовательно возрастают. Продвижение волны холода сверху вниз идет с большим запаздыванием. Так, если в верхнем слое почвы (0,2–0,5 м) самая низкая температура наблюдается в феврале, то период ее проникновения на 3,2 м имеет широкий временной диапазон – от апреля до июня. Самой высокой температуре соответствует инсоляционный тип распределения (значения с глубиной уменьшаются). В целом, если на глубине 0,2 м она наблюдается в июле, то глубины 3,2 м достигает через 90 суток (октябрь).

В рассматриваемом регионе самая низкая среднемесячная температура изменяется от –5,0 до –10,5 °С на глубине 0,2 м и от 1,5 до 0 °С на глубине 3,2 м (см. рис. 1). Согласно классификации мерзлотно-термического режима [*Трофимова, 2008*], зимой почвы имеют умеренно интенсивное, умеренно слабое и слабое охлаждение. Сезонное промерзание растянуто во времени (начало октября – конец марта) и составляет от 1,2–1,4 до 2,4–3,2 м. Оттаивание, наоборот, протекает быстро: наступает в первой половине апреля и заканчивается в конце мая. В почвенном профиле сезонная мерзлота присутствует в среднем около 7,5 месяцев. Самая высокая среднемесячная температура почвы на глубине 0,2 м варьирует от 20,0 до 11,0 °С, а на 3,2 м – от 8,0 до 3,0 °С. Температура 10 °С наблюдается в среднем до глубины 2,3 м (см. рис. 1). По качественной оценке, летнее прогревание почв интенсивное, умеренно интенсивное и умеренно слабое.

Контрастность летних и зимних температур отражается в годовой амплитуде, которая на глубине 0,2 м составляет от 16 до 30 °С, а на 3,2 м – от 2,5 до 7,5 °С. Причем в основе высоких амплитуд лежат низкие зимние и высокие летние температуры, а более низких амплитуд, наоборот, высокие зимние и низкие летние температуры. Среднегодовая температура почвы варьирует от 1,0 до 3,5 °С, воздуха – от –4 до –5 °С, наибольшая за зиму высота снежного покрова 30–50 см.

Реакция температуры почвы на изменения климата

Проведенный анализ временных рядов температуры почв (1964–2000 гг.) в отдельных районах Приангарья показал, что в большинстве случаев наблюдается рост как самой высокой и самой низкой среднемесячных температур в годовом цикле, так и среднегодовой температуры. Существенный вклад в величину линейного тренда привнесло аномальное повышение температуры в последнее десятилетие XX в. [*Трофимова, 2007*]. Учитывая, что на формировании термического режима почв помимо температуры воздуха сказывается влияние снежного покрова, растительности и т. д., тенденция изменений температуры почвы не всегда повторяет динамику температуры воздуха, более того, они могут быть разнонаправленными во времени и пространстве. К тому же, температуру почвы, в отличие от температуры воздуха, определяют условия предшествующего сезона. Особенно проявляется последействие зимнего режима на весенне-летний режим.

Оценка реакции температуры почвы на глубине 3,2 м на современные изменения климата на юге Сибирской платформы проведена по данным метеостанций Жигалово и Киренск. Из девяти рассматриваемых метеостанций региона они наиболее близко расположены к объектам техногенного нарушения ландшафтов (трасса газопровода Ковыкта–Жигалово) и имеют однородные ряды наблюдений без существенных погрешностей измерений. Метеостанции находятся на левом берегу Лены, но в различных орографических условиях. Поэтому, несмотря на то, что метеостанция Жигалово расположена намного южнее Киренска, температура воздуха летом, зимой и в целом за год в первом случае несколько ниже, чем во втором. Более низкая температура воздуха и меньшая высота снежного покрова в Жигалово определяют большее охлаждение почвы зимой и несколько меньшее нагревание летом, чем в Киренске.

Многолетняя динамика самой низкой и самой высокой температур почвы в Жигалово характеризуется незначительными положительными линейными трендами (в основном за счет высокой температуры нескольких последних анализируемых лет). Причем на глубине 3,2 м самая низкая температура варьирует по годам от –0,4 до 1,0 °С и имеет слабую тенденцию роста, самая высокая температура колеблется от 5,9 до 9,2 °С и обладает несколько большей величиной тренда. Многолетний ход среднегодовой температуры в большей степени повторяет ход самой высокой температуры (рис. 2).

Тенденция роста как самой высокой и самой низкой среднемесячных температур почвы, так и среднегодовой температуры наблюдается и в Киренске. Имеются лишь некоторые различия по степени выраженности циклов их повышения и понижения (см. рис. 2). Характерная особенность многолетней динамики температуры почвы состоит в том, что и в Жигалово, и в Киренске наблюдается наиболее интенсивный ее рост в теплый период года, а не в холодный, как это характерно для температуры воздуха.

Многолетний ход высоты снежного покрова за рассматриваемый период в Жигалово характеризуется незначительным положительным линейным трендом, в то время как в Киренске тенденция к ее изменению практически не прослеживается (см. рис. 2).

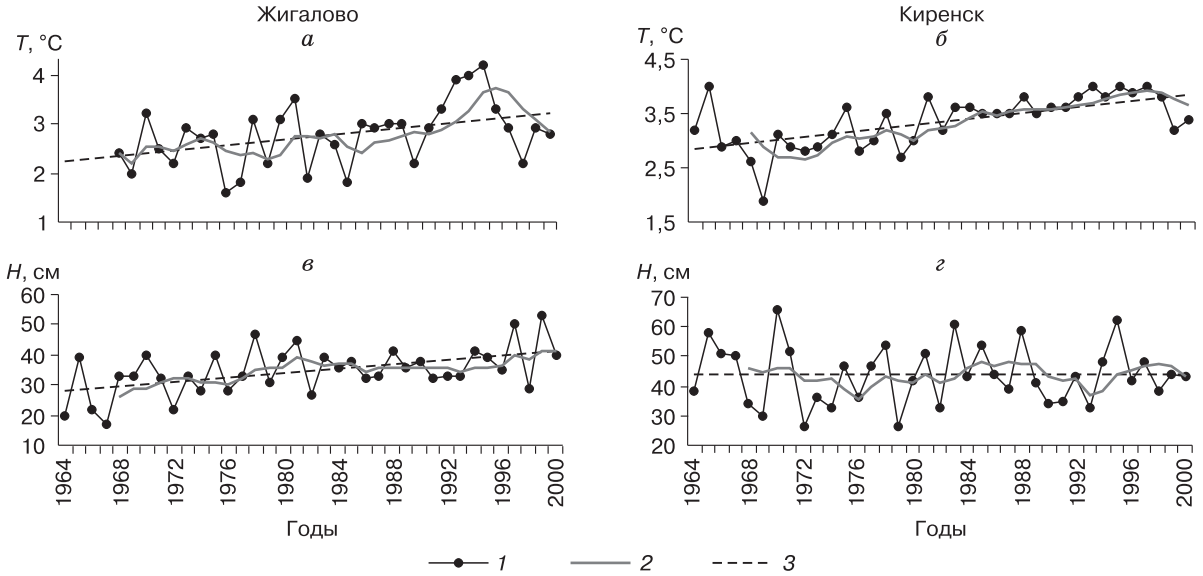

Рис. 2. Динамика среднегодовой температуры почв на глубине 3,2 м (*а*, *б*) и высоты снежного покрова (*в*, *г*) на метеостанциях Жигалово (*а*, *в*) и Киренск (*б*, *г*):

1 – многолетний ход, *2* – сглаженный по пятилетиям, *3* – линейный тренд; *а* – $y = 0{,}0269x + 2{,}2115$, $R^2 = 0{,}1698$; *б* – $y = 0{,}0277x + 2{,}8275$, $R^2 = 0{,}3907$; *в* – $y = 0{,}3589x + 27{,}964$, $R^2 = 0{,}2495$; *г* – $y = -0{,}0005x + 43{,}82$, $R^2 = 3 \cdot 10^{-7}$.

Положительные линейные тренды зафиксированы и на тех метеостанциях рассматриваемой территории, на которых имеются полные и достаточно качественные многолетние ряды наблюдений. Там, где имеются погрешности в измерениях (пропуски) или период наблюдений короче на 2–3 года, дополнительной информацией в оценке реакции температуры почвы на климатические изменения послужили временные ряды температуры почвы.

Далее рассмотрена динамика температуры почвы и в области прерывистой многолетней мерзлоты (южная часть Патомского нагорья). Почва на террасе правого берега р. Жуя (метеостанция Светлый) дерново-болотная супесчаная на песчаной материнской породе. Здесь многолетняя температура на глубине 3,2 м в течение всего годового цикла сохраняет отрицательные значения (самая низкая среднемесячная температура –1,3 °С, самая высокая –0,1 °С). Среднегодовая температура отрицательная по всему почвенному профилю. Причем на глубине 0,2 м она значительно ниже (–1,5 °С), чем на 3,2 м (–0,5 °С). Почвы с таким термическим режимом характеризуются как многолетнемерзлые сезоннопротаивающие. В этой ситуации на глубине 3,2 м достаточно хорошо выражен положительный линейный тренд (0,20 °С/10 лет), причем нарастающий темп увеличения температуры относится к 80-м гг. XX в. Это свидетельствует о том, что сигнал потепления климата достиг этого слоя (и даже глубже) и в многолетнемерзлых грунтах. Вместе с тем температура на этой глубине в течение всего года в последнем десятилетии XX в. оставалась слабоотрицательной (–0,1 °С).

Геокриологические риски при техногенных воздействиях

На рассматриваемой территории с островами высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов (ММГ) располагается ряд осваиваемых нефтегазовых месторождений (Чонское, Талаканское, Ярактинское и др.), проложен нефтепровод Восточная Сибирь–Тихий Океан. Потепление климата (в сочетании с техногенезом) может сопровождаться негативными последствиями для функционирования природно-технических систем. Поэтому вопрос оценки геокриологического риска в такой ситуации приобретает особую практическую значимость.

Проведена оценка риска по трассе газопровода Ковыкта–Жигалово, где ЗАО “Востсибтранспроект” в 2005 г. были выполнены инженерно-экологические изыскания. В зависимости от геоморфологического положения в рельефе и строения рыхлых отложений нами выделены четыре района развития многолетнемерзлых грунтов. В каждом из районов зафиксированы характерные участки мерзлоты (рис. 3, табл. 1).

В районе I находится 11 участков мерзлоты, протяженность которых составляет от 93 до 1900 м. Многолетняя мерзлота приурочена пре-

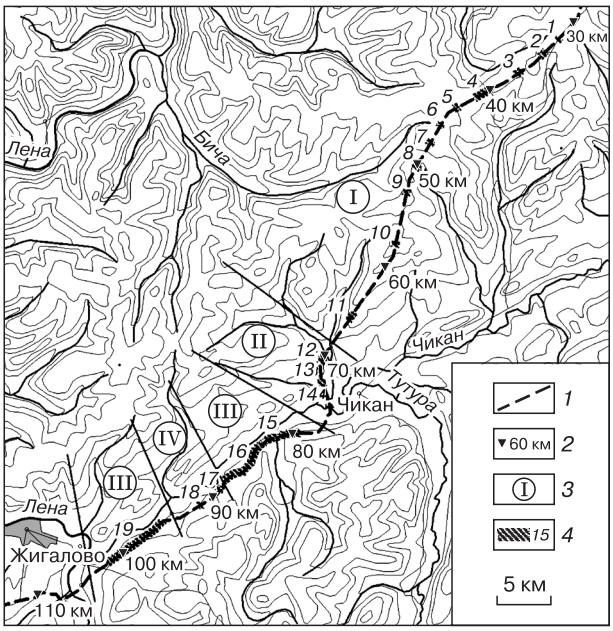

Рис. 3. Расположение районов и местоположение участков развития многолетнемерзлых грунтов.

1 – трасса газопровода; *2* – километраж трассы; *3* – номер района; *4* – участки (с номером) многолетнемерзлых грунтов.

имущественно к пониженным местам (вершинам распадков, ложбин). Располагается она на днище или пологих склонах, сложенных элювиально-делювиальными щебенисто-дресвяными отложениями с суглинком до 30 % и содержанием льда до 5 % (здесь и далее по тексту приведены значения содержания льда в породах за счет ледяных включений).

При протаивании суглинок тугопластичный. Верхняя граница ММГ залегает на глубине от 1,5 до 3,2 м, а нижняя практически во всех случаях проходит в скальных отложениях. Только в одном месте в рыхлых отложениях была встречена линза многолетней мерзлоты длиной 640 м и мощностью 1,4–2,2 м (нижняя граница на глубине 3,4–4,2 м).

Районы II и III развития ММГ расположены в долинах рек Бурунги и Тутуры. На террасах р. Бурунга длина участков (12–14) многолетней мерзлоты варьирует от 80 до 1300 м, в долине р. Тутура (15, 16, 19) – от 3516 до 6237 м. Многолетняя мерзлота развита в заторфованных суглинках, в галечниковых и дресвяных грунтах с суглинком до 30 %. С увеличением содержания льда в рыхлых отложениях при протаивании меняется и консистенция грунта от полутвердой и тугопластичной до текучей. С поверхности рыхлые отложения перекрыты слоем торфа мощностью 0,3–3,6 м и заболочены. В местах, где мощность торфа максимальная, верхняя граница ММГ проходит вблизи дневной поверхности на глубине 0,3 м, на незаторфованных участках она опускается на глубины 1,3–2,5 м. В днищах долин р. Тутура и в большинстве ее левых притоков многолетняя мерзлота отсутствует, что объясняется отепляющим влиянием водотоков.

В районе IV выделено два участка (17, 18) многолетней мерзлоты протяженностью 79 и 556 м соответственно. Многолетняя мерзлота приурочена к ложбинам стока у основания подошвы левого коренного склона долины р. Тутура и развита в заторфованных суглинках и щебенистых грунтах с суглинком до 30 %. При протаивании грунт становится мягкопластичным или текучим. Отмечается большое содержание льда в рыхлых отложениях (до 40 %).

По условиям развития термокарста участки многолетнемерзлых грунтов по степени риска объединены в четыре группы (табл. 2).

Проектом на этапе строительства трассы газопровода Ковыкта–Жигалово, к сожалению, не были предусмотрены стационарные площадки для получения количественных показателей динамики криогенных процессов. Между тем на стадии строительства и рекультивации трассы газопровода на отдельных участках отмечены проявления термокарста (по результатам наземного и воздушного фотомониторинга). Со временем растет вероятность увеличения площади пораженности тер-

Таблица 1. **Районы и участки развития многолетнемерзлых грунтов**

Район	Местоположение	Участки	Общая протяженность, м	Доля участков, %
I	Водораздел между реками Орлингой и Леной от Ковыкты до р. Бурунга с развитием элювиально-делювиальных отложений современного возраста	1–11	5694	24
II	Террасы долины р. Бурунга с развитием аллювиальных отложений современного возраста	12–14	2147	9
III	Левобережные террасы р. Тутура с развитием аллювиальных отложений современного и верхнечетвертичного возраста	15, 16, 19	15 023	64
IV	Левобережье р. Тутура в основании коренного склона с развитием элювиально-делювиальных отложений современного возраста	17, 18	635	3
	Итого	19	23 499	100

Таблица 2. **Оценка риска развития термокарста по трассе газопровода**

Участки	Степень риска	Характеристика многолетнемерзлых грунтов
1–11	Низкая	Щебенистый и дресвяный грунт с суглинком до 30 % и включением льда 5–10 %; при оттаивании суглинок полутвердый и тугопластичный
17	Средняя	Грунт (суглинок) с включением льда от 5 до 15 %; при оттаивании грунт мягко- и тугопластичный
12, 13, 15, 16	Высокая	Грунт (суглинок) с включением льда до 40 %; при оттаивании имеет различную консистенцию
14, 18, 19	Очень высокая	Грунт (суглинок) с включением льда 30–40 %; при оттаивании текучий

ритории термокарстом не только по трассе газопровода, но и на прилегающей местности. Возрастает также интенсивность процесса, что способствует риску возникновения таких явлений, как термопросадки, неравномерное пучение грунтов при промерзании и просадки их при протаивании. Перехват стока поверхностных вод на склоне термокарстовыми канавами по трассе газопровода вызывает дополнительное увлажнение грунтов на прилегающей территории. В данном случае возможность возникновения подобных процессов, связанных с изменениями режима поведения грунтов, развитием новых форм рельефа, можно охарактеризовать как сопряженное проявление геокриологического и геоморфологического рисков, которые будут влиять друг на друга.

Для выявления основных тенденций поведения мерзлотных процессов и разработки технических мероприятий по их предотвращению возникла необходимость в создании сети стационарных и полустационарных площадок наблюдений. Для этого составлена программа криомониторинга в соответствии с известной методикой [*Методические рекомендации..., 1979*].

В программе криомониторинга предложены наблюдения за основными результирующими характеристиками температурного режима грунтов (среднегодовая температура, мощность слоя сезонного промерзания–протаивания), режимом влажности грунтов, пучением грунтов при промерзании и их просадки при протаивании. Особое внимание предлагается уделить изучению процессов теплообмена грунтов и пограничного слоя атмосферы. Дополнительные наблюдения за восстановлением и динамикой растительности должны включать сведения о составе и динамике фитоценоза, встречаемости отдельных видов, сомкнутости растительного покрова.

Для уменьшения скорости или полного прекращения протаивания многолетнемерзлых грунтов нами предварительно рекомендованы следующие мероприятия:

– увеличение плотности, уменьшение мощности или удаление снежного покрова;

– затенение поверхности (насаждение деревьев, кустарников, устройство навесов);

– создание теплоизоляционных покрытий из высокопористых материалов;

– создание насыпей и подсыпок;

– дренирование поверхности, устройство организованного водоотвода.

Для снижения риска развития криогенных процессов эти мероприятия не являются окончательными и могут быть дополнены или изменены после разработки комплексных мероприятий, базирующихся на данных криомониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно отметить, что анализ временных рядов среднегодовой, самой низкой и самой высокой среднемесячных температур почвенной толщи в период 1964–2000 гг. выявил тенденцию их роста, что вполне согласуется с современным потеплением климата. Причем в большинстве случаев наблюдается более интенсивное повышение температуры почвы в теплый период года, а не в холодный, как это характерно для температуры воздуха. Кроме того, можно констатировать, что в естественных условиях реакция температуры почвы на потепление климата наблюдается на глубине 3,2 м не только в сезоннопромерзающей почвенной толще, но и в многолетнемерзлых сезоннопротаивающих грунтах. Поскольку было замечено, что самый существенный рост температуры почвы наблюдался в последнем десятилетии XX в., для более обоснованных выводов о характере ее дальнейших изменений на нескольких метеостанциях проведено сравнение трендов на глубине 3,2 м за периоды 1964–2000 и 1964–2008 гг. Причем их величины снизились незначительно.

Первые результаты исследований процессов, протекающих в высокотемпературных многолетнемерзлых грунтах в условиях техногенного нарушения земной поверхности, в дальнейшем следует уточнить, используя данные криомониторинга. Зафиксированные тенденции поведения многолетнемерзлых грунтов и рекомендованные мероприятия по снижению риска развития криогенных процессов могут быть использованы при проектировании трасс трубопроводов с северных месторождений на пункты сбора нефти магистрального нефтепровода Восточная Сибирь–Тихий океан.

Литература

Васильев И.С. Реакция термического режима почвогрунтов Якутии на современные изменения климата // Метеорология и гидрология, 1999, № 2, с. 98–102.

Гиличинский Д.А., Быховец С.С., Сороковиков В.А. и др. Использование данных метеорологических станций для оценки тенденций многолетних изменений температуры почв на территории сезонной и многолетней криолитозоны России // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 59–66.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология, 2004, № 4, с. 50–66.

Дучков А.Д., Балобаев В.Т. Эволюция теплового и фазового состояния криолитозоны Сибири // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 2001, с. 79–104.

Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Комаров А.И., Кусков А.И. Современные природно-климатические изменения в Сибири: ход среднегодовых приземных температур и давления // География и природ. ресурсы, 2004, № 3, с. 90–96.

Кляшторин Л.Б., Любушин А.А. О зависимости глобальной температурной аномалии от мирового потребления топлива // Современные глобальные изменения природной среды. М., Науч. мир, 2006, с. 337–543.

Кузьмин В.А. Почвенно-экологическое районирование Иркутской области // Почвоведение, 2002, № 12, с. 1436–1444.

Лещиков Ф.Н., Шац М.М. Мерзлые породы юга Средней Сибири. Новосибирск, Наука, 1983, 167 с.

Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А и др. Климат России в XXI веке. Ч. 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3 // Метеорология и гидрология, 2008, № 9, с. 5–21.

Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В. Геокриологические последствия современных изменений глобального климата // География и природ. ресурсы, 2007, № 3, с. 19–27.

Методические рекомендации по стационарному изучению криогенных физико-геологических процессов. М., ВСЕГИНГЕО, 1979, 72 с.

Михеев В.С. Экологический риск: определение, сущность, содержание // Экологический риск: анализ, оценка, прогноз (Материалы Всерос. конф.). Иркутск, Изд-во ИГ СО РАН, 1998, с. 3–5.

Павлов А.В. Состояние и направления развития наблюдательной сети геокриологического мониторинга // Рациональное природопользование в криолитозоне. М., Наука, 1992, с. 129–132.

Павлов А.В. Современное состояние мониторинга криолитозоны России и проблемы его развития // Материалы Первой конф. геокриологов России. М., МГУ, 1996, кн. 3, с. 327–336.

Павлов А.В. Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 22–27.

Трофимова И.Е. Современное состояние и тенденции многолетних изменений мерзлотно-термического режима почв Прибайкалья // География и природ. ресурсы, 2006, № 4, с. 38–45.

Трофимова И.Е. Тенденции многолетних изменений мерзлотно-термического режима почв // Географические исследования Сибири. Ландшафтная гидрология: теория и практика исследований. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2007, т. 3, с. 167–172.

Трофимова И.Е. Картографирование термического режима почвогрунтов Приангарья // География и природ. ресурсы, 2008, № 4, с. 130–136.

Чудинова С.М., Быховец С.С., Сороковиков В.А. и др. Особенности изменения температуры почв России в период последнего потепления климата // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 23–30.

Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 79–87.

Поступила в редакцию
22 января 2009 г.