

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД К ТЕХНОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ПРИ ОСВОЕНИИ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

С.Н. Булдович

Геологический факультет
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Воробьевы горы, Москва, Россия, 119899

Представлен метод приближенных расчетных оценок воздействия техногенных факторов на геокриологические условия и возможности начала деградации многолетнемерзлых пород. Отличительной чертой предлагаемого метода является возможность его применения для относительно небольших участков техногенного теплового воздействия различной формы и при слоистом строении верхней части разреза пород.

Ключевые слова: теплообмен, многолетнемерзлые породы, современные экзогенные геокриологические процессы, сезонно-талый слой, сезонно-мерзлый слой, численное математическое моделирование.

Освоение территории в области развития криолитозоны всегда сопровождается существенными изменениями поверхностных условий в связи с уничтожением или преобразованием напочвенных теплоизолирующих покровов (растительного, снежного), изменением условий дренирования пород, подтопления территории и возникновения водоемов различных размеров, преобразования верхних частей инженерно-геологического разреза при выемках, замене грунта, создании насыпей и др. В то же время многолетнемерзлые породы (ММП) формируются и существуют в результате теплообмена пород с внешней средой. Указанный теплообмен в значительной мере определяется совокупностью природных факторов, действующих именно на поверхности пород и в приповерхностных слоях пород.

Техногенные изменения поверхностных условий сопровождаются изменением важных геокриологических параметров — среднегодовой температуры пород и мощности сезонно-талого слоя (СТС) пород. Вследствие этих изменений сложным образом изменяются экзогенные геокриологические процессы и условия взаимодействия пород с фундаментами инженерных сооружений. Так, увеличение глу-

бин сезонного оттаивания приводит к росту сезонного пучения пород, но может сопровождаться и процессами термокарста, т.е. осадками дневной поверхности в результате вытаивания подстилающих СТС подземных льдов или льдистых пород. Повышение среднегодовой температуры пород в отрицательном спектре температур приводит в тонкодисперсных породах к уменьшению несущей способности свай за счет снижения сил смерзания с грунтом и т.д.

Наиболее опасным является качественное изменение геокриологической обстановки, т.е. переход многолетнемерзлых пород в талое состояние. Многолетнее оттаивание начинается при переходе среднегодовой температуры через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сопровождается деградацией ММП сверху и снизу. При этом прочностные свойства пород скачкообразно снижаются, начинается развитие очень опасных процессов — прогрессирующего термокарста, термоэрозии и др.

В связи с этим приобретает важность прогнозная оценка изменения геокриологической обстановки под влиянием техногенных изменений условий теплообмена пород с внешней средой. К резкому повышению среднегодовой температуры приводит снятие теплоизолирующих напочвенных растительных покровов (травяных, лишайниковых и особенно моховых), повышенное снегонакопление (в выемках, на склонах насыпей, вокруг различных инженерных сооружений), формирование водоемов и ряд других факторов. Важно то, что все эти факторы действуют взаимообусловленно, что затрудняет количественные оценки в связи с многофакторностью процесса [2]. В современных условиях для прогнозирования развития геокриологической обстановки используется компьютерное моделирование процессов подземного теплообмена, которое может обеспечить достаточно точное решение практически любых задач промерзания и оттаивания пород.

В то же время из-за высокой трудоемкости численного математического моделирования остаются весьма востребованными и методы инженерной оценки и прогнозирования геокриологической обстановки при изменении тех или иных факторов природной среды, влияющих на условия теплообмена в верхних слоях разреза пород. В настоящей работе предлагается метод приближенной количественной оценки условий перехода ММП в талое состояние. Основным принципиальным отличием предлагаемого подхода является его применимость к участкам с техногенного воздействия небольших размеров и различной конфигурации в плане. Кроме того, в рамках данной методики возможен учет неоднородного по вертикали разреза пород.

Традиционный подход к оценке условий перехода пород из мерзлого состояния в талое (и наоборот) основан на расчете потенциальных глубин оттаивания и промерзания пород и сравнения их между собой. Под потенциальными глубинами понимаются максимально возможные в данных природных условиях глубины сезонного оттаивания и промерзания пород при значении их среднегодовой температуры, равном температуре фазового перехода воды в породах (в общем случае $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Понятно, что если потенциальная глубина сезонного промерзания пород превышает глубину сезонного оттаивания, то наблюдается устойчивое существование или формирование ММП. В противном случае, когда потенциальная глубина сезонного оттаивания оказывается большей, чем глубина сезонного промерзания,

породы находятся в талом состоянии или происходит деградация ММП с образованием так называемой несливающейся мерзлоты (или мерзлоты с заглубленной кровлей) или наблюдается формирование ограниченных в плане таликов (несквозных и сквозных).

В случае равенства потенциальных глубин сезонного оттаивания и промерзания породы находятся в переходном состоянии — из талого в мерзлое или наоборот.

Указанный подход к оценке неустойчивого геокриологического состояния пород предложен Ю.Л. Шуром [4]. Для такой оценки можно использовать любые существующие приближенные зависимости для расчета глубин сезонного оттаивания и промерзания пород. В принципе, в расчетную схему может быть введено любое число различных температуроформирующих факторов: любые виды теплоизолирующих покровов (естественные и техногенные) на поверхности пород, теплофизические свойства грунтов, конвективный теплообмен в породах (инфильтрация) и т.д.

Суть расчета заключается в нахождении по всей совокупности известных (заданных) параметров критического значения одного фактора (или суммы нескольких), обеспечивающего переход из пород из одного физического состояния в другое. Так, при известных теплофизических параметрах грунтов и покровов может быть найдена критическая мощность снега. При известном термическом сопротивлении снега можно определить, например, критическую величину мощности растительного напочвенного покрова или таких параметров, как влажность пород или интенсивность инфильтрации дождевых вод и т.д. Полученные критические величины сравниваются с природными, на основе чего делается вывод о существующем или прогнозируемом физическом состоянии пород.

Описанный выше метод имеет один принципиальный недостаток — все приведенные выше рассуждения справедливы лишь в том случае, когда геокриологические условия оцениваются в пределах крупных участков поверхности, т.е. когда контуры с однородными природными условиями имеют значительные размеры в плане и влияние окружающих участков не сказывается в центральной части этих контуров. В действительности при значительной разнице температурного режима пород в рассматриваемом контуре и на окружающих территориях формируется дополнительные теплотокки, направленные от контуров с относительно более высокой температурой в приповерхностных слоях пород к более «холодным» контурам. При небольших размерах участков с различной температурой пород интенсивность указанных теплотокков становится сравнимой с уровнем теплообмена пород с атмосферой, и они должны учитываться при расчете глубин потенциально оттаивания и промерзания пород.

В настоящей работе предлагается развитие существующей оценки критического состояния ММП применительно именно к специфическим условиям инженерного освоения территории.

Указанная специфика связана, во-первых, с контрастными изменениями компонентов природной среды на относительно небольших участках (строительные площадки, дороги, здания и сооружения и т.д.), что вызывает необходимость уче-

та в расчетной схеме дополнительного бокового теплообмена между участками с разным температурным режимом пород.

Во-вторых, в ходе инженерного освоения часто помимо уничтожения или изменения поверхностных покровов осуществляется преобразование и верхней части геологического разреза за счет выемки или замены грунтов, создания различных насыпей. Поэтому предлагаются специальные расчетные зависимости для определения глубин потенциального сезонного оттаивания и промерзания пород, учитывающие сложное строение грунтового разреза по вертикали.

Вначале рассматривается применение метода оценки критической геокриологической обстановки для температурных контуров (ТК) с большими (неограниченными) размерами в плане. Затем будет показан подход к определению устойчивости ММП в пределах относительно небольших ТК.

Определение критических геокриологических характеристик в неограниченных в плане температурных контурах (ТК)

Рассматриваемая расчетная схема отличается от предложенных ранее [4] наличием в пределах сезонно промерзающей и протаивающей части разреза двух слоев влажных пород с различными теплофизическими характеристиками. Это существенно расширяет возможности метода и позволяет прогнозировать возникновение таликов (или новообразования мерзлых толщ) при наличии слоев промерзающих биогенных образований (торф, мох), создании подсыпок, замене грунтов в выемках и т.д.

Основные характеристики расчетной схемы следующие. Рассматривается промерзание и оттаивание двухслойной грунтовой системы. Зимой под снегом с некоторым средним за зиму термическим сопротивлением залегает сухой непромерзающий слой (ягель, сухой мох, искусственное покрытие и пр.). Под непромерзающим теплоизолирующим слоем расположен первый промерзающий слой (влажный торф, мох, минеральный грунт, подсыпка и пр.). Ниже, до глубины оттаивания-промерзания, залегают породы второго промерзающего слоя пород. Для летнего периода из схемы исключается снежный покров. Всем слоям при даются значения теплофизических параметров и мощностей (летних и зимних) в соответствии с конкретной природной обстановкой; в случае отсутствия каких-либо слоев их мощность приравняется нулю.

Температура дневной поверхности (зимой — снега, в летний период — напочвенных покровов) должна определяться по температуре воздуха с учетом радиационной поправки.

Глубины летнего оттаивания и зимнего промерзания пород могут быть выражены следующим образом:

$$\xi_{\text{л}} = \sqrt{E_{\text{л}}^2 + 2F_{\text{л}}} - E_{\text{л}}, \quad (1a)$$

$$\xi_{\text{з}} = \sqrt{E_{\text{з}}^2 + 2F_{\text{з}}} - E_{\text{з}}, \quad (16)$$

$$E_{\text{л}} = \lambda_{\tau 2} \left(R_{\text{л}}^{\text{л}} + \frac{m_1}{\lambda_{\tau 1}} a_{\text{л}} \right), \quad F_{\text{л}} = \lambda_{\tau 2} \left\{ m_1 \left[R_{\text{л}}^{\text{л}} b + \frac{m_1}{2\lambda_{\tau 1}} (a_{\text{л}} + b) \right] + \frac{\Omega_{\text{л}}^{\text{л}}}{Q_{\phi 2}} \right\},$$

$$E_3 = \lambda_{m2} \left(R_{\Pi}^3 + \bar{R}_{\text{CH}} + \frac{m_1}{\lambda_{m1}} a_3 \right),$$

$$F_3 = \lambda_{m2} \left\{ m_1 \left[\left(R_{\Pi}^3 + \bar{R}_{\text{CH}} \right) \cdot b + \frac{m_1}{2\lambda_{m1}} (a_3 + b) \right] + \frac{|\Omega_3^{\Pi}|}{Q_{\Phi 2}} \right\},$$

$$a_{\text{л}} = 1 - \frac{\lambda_{\tau 1}}{\lambda_{\tau 2}}, \quad a_3 = 1 - \frac{\lambda_{m1}}{\lambda_{m2}}, \quad b = 1 - \frac{Q_{\Phi 1}}{Q_{\Phi 2}}, \quad R_{\Pi}^3 = \frac{l_{\Pi}^3}{\lambda_{\Pi}^3}, \quad R_{\Pi}^{\text{л}} = \frac{l_{\Pi}^{\text{л}}}{\lambda_{\Pi}^{\text{л}}}, \quad \bar{R}_{\text{CH}} = \frac{\bar{h}_{\text{CH}}}{\bar{\lambda}_{\text{CH}}},$$

где $R_{\Pi}^{\text{л}}$, R_{Π}^3 — летнее и зимнее термические сопротивления напочвенного покрова; $l_{\Pi}^{\text{л}}$, l_{Π}^3 — мощность непромерзающего покрова в летний и зимний периоды; $\lambda_{\Pi}^{\text{л}}$, λ_{Π}^3 — теплопроводность непромерзающего теплоизолирующего покрова в летнее и зимнее время; \bar{R}_{CH} — среднее за зиму термическое сопротивление снежного покрова; \bar{h}_{CH} и $\bar{\lambda}_{\text{CH}}$ — средняя мощность и теплопроводность снежного полкрова; m_1 — мощность первого промерзающего слоя пород; λ_{m1} , $\lambda_{\tau 1}$, λ_{m2} , $\lambda_{\tau 2}$ — теплопроводности талых и мерзлых пород первого и второго промерзающих слоев соответственно; $Q_{\Phi 1}$, $Q_{\Phi 2}$ — теплота фазовых переходов первого и второго промерзающих слоев; $\Omega_{\Pi}^{\text{л}}$, $\Omega_3^{\text{л}}$ — сумма градусочасов на дневной поверхности за летний и зимний периоды.

Критические величины параметров теплообмена, приводящие к переходу пород в талое состояние, находятся из условия равенства

$$\xi_3 = \xi_{\text{л}}. \quad (2)$$

В общем случае значения искомым критических параметров определяются при указанном условии подбором из зависимостей (1). Некоторые параметры могут быть выражены непосредственно. Это касается, например, величины критического термического сопротивления снега $\bar{R}_{\text{CH}}^{\text{кр}}$. Выражение для определения указанной характеристики в рамках рассматриваемой расчетной схемы имеет вид

$$\bar{R}_{\text{CH}}^{\text{кр}} = \frac{\xi_{\text{л}} \left(S + \frac{\xi_{\text{л}}}{2\lambda_{m2}} \right) - m_1 G \frac{|\Omega_3^{\Pi}|}{Q_{\Phi 2}}}{(m_1 b - \xi_{\text{л}})}, \quad (3)$$

$$S = R_{\Pi}^3 + \frac{m_1}{\lambda_{m1}} a_3; \quad G = R_{\Pi}^3 b + \frac{m_1}{2\lambda_{m1}} (a_3 + b), \quad a_3 \text{ и } b \text{ — см. (1).}$$

При расчете по уравнениям (1) необходимо проверять выполнение условия $\xi > m_1$, в противном случае граница сезонного промерзания или оттаивания не выходит из первого промерзающего слоя и грунтовый разрез является однослойным.

В этом случае, когда грунтовый разрез можно считать однородным, расчетные зависимости заметно упрощаются и имеют вид

$$\xi_{\text{л}} = \sqrt{s_{\text{л}}^2 + \frac{2\lambda_{\tau} \Omega_{\text{л}}^{\text{л}}}{Q_{\Phi}}} - s_{\text{л}}, \quad s_{\text{л}} = \lambda_{\tau} R_{\Pi}^{\text{л}}, \quad (4a)$$

$$\xi_3 = \sqrt{s_3^2 + \frac{2\lambda_T |\Omega_3^П|}{Q_\Phi}} - s_3, \quad s_3 = \lambda_M (\bar{R}_{CH} + R_{П}^3), \quad (46)$$

а значение критического сопротивления снега с учетом (2) будет

$$\bar{R}_{CH}^{кр} = \frac{|\Omega_3^П|}{\xi_{Л} Q_\Phi} - \frac{\xi_{Л}}{2\lambda_M} - R_{П}^3. \quad (5)$$

При освоении территории очень часто в результате подтопления поверхности формируются водоемы различных размеров и глубины. Известно, что водный покров является мощным утепляющим фактором, способным формировать талики под водоемами даже в наиболее суровых природных условиях континента. Это влияние при прочих равных условиях сильно зависит от глубины водоема. Если при малой глубине водоема донные отложения характеризуются отрицательной среднегодовой температурой, находятся в многолетнемерзлом состоянии и только сезонно оттаивают на небольшую глубину, то с ростом глубины водоема температура пород становится положительной и донные отложения сезонно промерзают в зимний период. При глубине водоема большей мощности зимнего ледяного покрова донные породы постоянно находятся в талом состоянии при положительной температуре. Используя принцип определения переходного состояния пород, основанный на равенстве глубин потенциальных сезонного промерзания и оттаивания пород, можно получить весьма простое выражение и для оценки критической глубины водоема $m_{кр}$, соответствующей началу деградации ММП под водным покровом:

$$m_{кр} = \sqrt{d^2 - e} - d, \quad (6)$$

$$d = \bar{R}_{CH} \lambda_{Л} + \frac{Q_\Phi}{L\rho_{Л}} \xi_{Л},$$

$$e = \frac{2\lambda_{Л}}{L\rho_{Л}} (\Omega_3^П + \alpha \cdot \Omega_{Л}^a + \bar{R}_{CH} Q_\Phi \xi_{Л}),$$

$$\alpha = \frac{\lambda_T}{\lambda_M},$$

$$\xi_{Л} = \sqrt{\frac{2\lambda_T \Omega_{Л}^a}{Q_\Phi}},$$

где $\lambda_{Л}$ — теплопроводность льда; $\rho_{Л}$ — плотность льда; L — удельная теплота фазового перехода воды; λ_T, λ_M — теплопроводность донных отложений в талом и мерзлом состояниях; \bar{R}_{CH} — среднее термическое сопротивление снега на льду водоема; $\Omega_{Л}^a$ — сумма летних градусочасов воды на мелководье водоема после схода льда, остальные обозначения прежние.

Оценка устойчивости ММП в температурных контурах (ТК) ограниченных размеров

Изложенное выше справедливо, как уже отмечалось, для внутренних областей больших по площади участков отепляющего влияния ТК факторов природной среды. В действительности при рассмотрении участков криолитозоны с относительно небольшими плановыми размерами ТК вклад бокового теплового влияния со стороны окружающих многолетнемерзлых пород в структуру внутригодового теплообмена приповерхностных слоев пород внутри указанных участков становится заметным.

Реальные природные и искусственные объекты такого типа весьма разнообразны. Это, например, небольшие водоемы или водотоки, западины, засыпаемые снегом в результате метелевого переноса, куртины густого кустарника (тальник и др.), аккумулирующие на себе мощный снежный покров, застраиваемые участки с чрезвычайно сложным, контрастным по площади характером снегонакопления и тепловыделяющими зданиями и т.п. Во всех этих случаях весьма вероятным является формирование небольших по площади таликов, как правило, несквозных. Прогнозирование возникновения таких таликов требует учета бокового теплового влияния внешних массивов многолетнемерзлых пород.

В общем виде действие отепляющих факторов приводит к возрастанию температуры пород в пределах ТК и сопровождается возникновением кондуктивного теплопотока в породах, направленного из контура приложения тепловой нагрузки в сторону более холодных окружающих мерзлых пород. Температурное поле и структура тепловых потоков в полупространстве пород под ТК и в их окрестностях могут быть достаточно полно исследованы с помощью известных решений стационарных задач теплопроводности в двухмерной и даже трехмерной [1] постановке.

Из данных решений при задании постоянных температур в пределах ТК и на прилегающих площадях следует, что во всех случаях вблизи поверхности в пределах ТК тепловой поток имеет нисходящий характер и является практически одномерным — линии тока тепла направлены вертикально вниз и параллельны. По мере увеличения глубины происходит отклонение линий тока в сторону внешних границ ТК, тепловой поток меняет направление вначале на горизонтальное, затем на восходящее и выходит на поверхность в обрамлении ТК. Плотность нисходящего теплового потока через поверхность при неизменных теплофизических характеристиках пород тем выше, чем больше разница температур поверхности пород внутри и вне контура теплового возмущения и чем меньше плановые размеры этого ТК. Интенсивность теплового потока минимальна в центральной части ТК и возрастает в направлении его границ.

Понятно, что для формирования талика, воздействие отепляющих факторов в условиях постоянного отвода тепла вглубь массива пород должно быть выше, чем при отсутствии такового и применение традиционного подхода для количественной оценки возможности формирования или устойчивости талика может приводить к существенным ошибкам.

Несмотря на важность проблемы, в литературе отсутствуют какие-либо методы оценки устойчивости малых таликовых форм при сильном тепловом воз-

действию окружающих мерзлых толщ. В связи с этим автором было выполнено численное математическое моделирование условий теплообмена в таликах ограниченного размера, которое позволило выявить основные закономерности формирования таких таликов. Кроме того, детальное рассмотрение на модели некоторых специфических особенностей годового теплообмена в массиве и сезонного промерзания и оттаивания пород позволило предложить сравнительно простой аналитический метод приближенной количественной оценки факторов природной среды, критических для существования ограниченных в плане таликов.

Численное математическое моделирование выполнялось на ПЭВМ с использованием программы «Тепло», разработанной на кафедре геофизиологии МГУ [3]. Решалась серия задач в двух постановках: двухмерной (для линейных, вытянутых контуров теплового возмущения на поверхности) и двумерной осесимметричной (для округлых контуров). Основной исследуемой характеристикой при этом являлась критическая величина термического сопротивления ($\bar{R}_{\text{сн.кр}}^{\text{T}}$) снежного покрова повышенной мощности в пределах ТК, которая приводила к началу формирования талика.

Для каждого фиксированного планового размера ТК решалась серия задач в спектре изменения термического сопротивления снежного покрова. Затем проводился анализ состояния пород в течение года на предмет круглогодичного существования талых пород в нижней части слоя сезонного промерзания-оттаивания в центральной части контура теплового возмущения. Наличие непромерзающего слоя пород в центре ТК, где плотность нисходящего теплопотока минимальна, отвечает предельным условиям зарождения талика.

В результате выполненного моделирования установлено, что критическая величина термического сопротивления снега $\bar{R}_{\text{сн.кр}}^{\text{T}}$, приводящая к началу развития талика в центральной части ТК (в данном случае под тепловым контуром понимается участок повышенного снегонакопления) небольших в плане размеров, существенно превышает таковую в условиях ТК неограниченных размеров.

При достижении критической величины термического сопротивления снежного покрова талик мощностью в первые сантиметры формируется непосредственно в центре ТК. При увеличении термического сопротивления снежного покрова сверх критического значения $\bar{R}_{\text{сн.кр}}^{\text{T}}$ для данного контура, талик начинает расширяться и углубляться, однако размеры собственно талика в плане всегда остаются меньшими, чем размеры ТК.

Приведенные закономерности возникновения таликов под небольшими в плане температурными контурами получены при исследовании изменений свойств снежного покрова, как наиболее мощного и удобного для анализа фактора природной среды, однако они полностью сохраняют силу и при вариациях других возможных отепляющих факторов — изменения климатических характеристик, свойств растительного покрова, влажности и теплофизических свойств пород и др.

Ниже предлагается метод аналитической оценки и прогноза условий формирования ограниченных в плане таликов, основанный на результатах математического моделирования.

Расчетная схема составляется для центральной части ТК, где за счет бокового влияния со стороны обрамляющих мерзлых пород существует субвертикальный нисходящий тепловой поток. В этих условиях переходному состоянию пород из мерзлого в талое состояние соответствует ситуация равенства глубины летнего (сверху) оттаивания пород и полного (сверху и снизу) зимнего промерзания этого слоя. Таким образом, применяя соответствующие уравнения, описывающие сезонные промерзание и оттаивание пород в центре ТК при наличии нисходящего теплового потока в подстилающих породах, можно оценить критическое значение любого из возможных отепляющих факторов, приводящее к формированию талика с учетом бокового влияния мерзлых пород.

Численное моделирование процесса показывает, что при соотношении планового размера ТК и мощности слоя сезонного промерзания порядка 8—10 и более, температурное поле в приповерхностных слоях пород в центральной части контура теплового возмущения является практически одномерным. Таким образом, аналитическая расчетная схема применима к контурам с минимальными поперечными размерами порядка 10 м. Расчет и прогнозирование таликов с меньшими размерами в плане возможны только с помощью численного математического моделирования, поскольку при этом процессы сезонного промерзания и оттаивания происходят в существенно неоднородном температурном поле.

Задача состоит из двух частей:

- расчет сезонного промерзания и оттаивания пород в условиях действия нисходящего теплотокота, который считается постоянным во времени;
- определение плотности этого потока тепла.

Для реализации первой части задачи необходимо рассмотреть динамику сезонного промерзания и оттаивания пород. Исходя из результатов численного моделирования можно утверждать, что переходному (из мерзлого в талое) состоянию пород соответствует следующая последовательность событий (рис. 1). Начальным считается момент времени максимального оттаивания пород в конце летнего периода. Далее происходит промерзание оттаявшего слоя пород сверху и снизу, причем в момент окончания зимнего периода τ_3 с переходом температуры поверхности в положительную область движение фронта промерзания сверху останавливается, фронт промерзания пород снизу продолжает двигаться вверх с постоянной скоростью, а от поверхности пород начинает опускаться фронт летнего оттаивания. В некоторый момент времени $\tau_{см}$ произойдет смыкание нижнего и верхнего слоев промер-

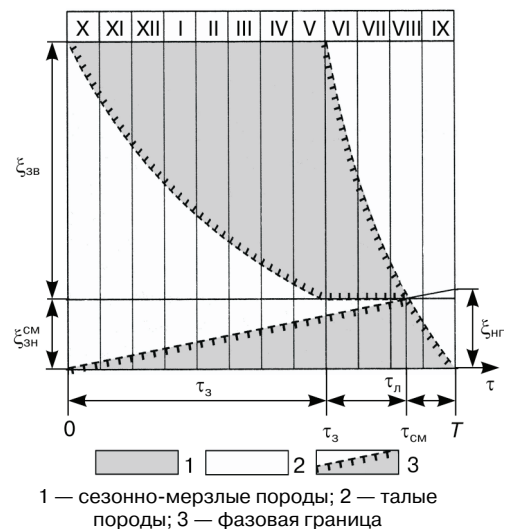


Рис. 1. Динамика сезонного промерзания-оттаивания пород в центре теплового контура при начале многолетнего оттаивания пород

зания. Предельному переходному условию соответствует ситуация, когда в этот же момент к точке смыкания нижнего и верхнего фронтов промерзания подойдет фронт летнего оттаивания. В оставшуюся часть летнего периода происходит разрушение слоя пород $\xi_{\text{зн}}^{\text{см}}$, промерзшего снизу к моменту $\tau_{\text{см}}$, т.е. за весь зимний и большую часть летнего периодов. К концу лета (момент завершения полного годового цикла) фронт оттаивания сверху достигает исходного положения на нулевой момент времени, и далее начинается новый годовой цикл.

В рассмотренной схеме важно, что зимнее промерзание пород сверху и снизу происходит независимо друг от друга — они разделены талым слоем пород с близкой к нулю температурой, где тепловые потоки практически отсутствуют. Оттаивание пород сверху большую часть летнего периода с момента τ_3 до $\tau_{\text{см}}$ также происходит при нулевом оттоке тепла от фронта оттаивания вниз, поскольку ниже в это время еще существует талый слой пород (см. рис. 1). И только в конце летнего периода на процесс оттаивания слоя промерзших снизу пород $\xi_{\text{зн}}^{\text{см}}$ начинает влиять нисходящий тепловой поток q_{T} , направленный от фронта оттаивания в подстилающие породы. Для упрощения расчетных зависимостей с учетом приближенности решения и процесс оттаивания в конце летнего периода

Из сказанного видно, что расчет глубины сезонного промерзания сверху может производиться по приведенным выше зависимостям (1 б) и (4 б). Не вызывает труда и определение величины сезонного промерзания пород снизу под действием нисходящего теплопотока q_{T} к моменту смыкания $\tau_{\text{см}}$ верхнего и нижнего фронтов промерзания:

$$\xi_{\text{зн}}^{\text{см}} = \frac{q_{\text{T}} \tau_{\text{см}}}{Q_{\text{ф}}}. \quad (7)$$

Основная трудность связана с расчетом конечного этапа летнего оттаивания пород, когда на процесс движения фронта оттаивания начинает действовать нисходящий тепловой поток. Традиционный метод учета воздействия этого теплопотока приводит к трансцендентному уравнению, что неудобно для расчета. Исходя из общего оценочного характера метода, можно использовать следующий приближенный способ упрощения расчетной зависимости. Для этого воздействие основного теплопотока от поверхности к фронту оттаивания и нисходящего теплопотока от фронта оттаивания вглубь массива пород разделяются во времени. Считается, что вначале действует только нижний теплопоток и за оставшееся после момента смыкания $\tau_{\text{см}}$ время до конца летнего периода за счет отвода тепла промерзает дополнительный слой породы мощностью:

$$\Delta \xi = \frac{(T - \tau_{\text{см}}) q_{\text{T}}}{Q_{\text{ф}}}. \quad (8)$$

Тогда за счет прихода тепла от поверхности после момента смыкания $t_{\text{см}}$ до конца лета должен оттаять не только промерзший снизу слой $\xi_{\text{зн}}^{\text{см}}$ (см. (7)),

но и дополнительный мерзлый слой $\Delta\xi$ (из (8)). Вместе они составляют слой потенциального промерзания за весь год (см. рис. 1):

$$\xi_{\text{нг}} = \frac{Tq_{\text{T}}}{Q_{\phi}}. \quad (9)$$

Такой подход привел к заметному упрощению расчетов, в частности, в этом случае отпадает необходимость определения времени смыкания $\tau_{\text{см}}$. Анализ показывает, что принятое упрощение незначительно влияет на точность определения глубины летнего оттаивания пород.

Таким образом, для начала образования талика в рассматриваемых условиях летнее оттаивание с поверхности $\xi_{\text{л}}$ должно равняться сумме глубины зимнего потенциального оттаивания сверху и мощности слоя потенциального промерзания снизу за весь год под действием нисходящего потока тепла:

$$\xi_{\text{л}} = \xi_{\text{зв}} + \xi_{\text{нг}}. \quad (10)$$

Под $\xi_{\text{л}}$ понимается потенциальное оттаивание пород за весь летний период, которое может определяться по зависимостям (1 а) (двухслойная схема) и (4 а) (однослойная схема). В зависимости для нахождения критической глубины водоема (6) вместо величины $\xi_{\text{л}}$ в формулы для величин d и e подставляется величина $\xi_{\text{л}} - \xi_{\text{нг}}$.

Подход к оценке критических параметров природной среды, соответствующих началу многолетнего оттаивания, заключается в следующем. Если требуется найти зимний фактор, например критическую мощность снежного покрова, то вначале рассчитывается глубина летнего оттаивания пород, которая, после вычисления из (9) потенциального годового промерзания снизу, позволяют из уравнения (10) найти требуемую глубину зимнего промерзания сверху, а по этой величине обратным расчетом находится искомая критическая характеристика снежного покрова. В случае, когда определению подлежат летние факторы, расчет начинается с определения зимнего промерзания сверху и, используя (10), находят глубину летнего оттаивания и необходимые для формирования этой глубины летние параметры среды.

В любом случае для расчета необходимо определение плотности потока тепла q_{T} от подошвы слоя сезонного промерзания-оттаивания пород в окружающие мерзлые толщи. С учетом результатов выполненного математического моделирования установлено, что для определения теплопотока q_{T} в центральной части ТК достаточно решить следующую стационарную задачу теплопроводности. Верхняя граница расчетной области — поверхность полупространства — располагается на уровне подошвы слоя сезонного промерзания-оттаивания пород (СМС или СТС), на ней задаются постоянные по площади температуры, равные среднегодовым температурам пород внутри ТК и за его пределами. Внутри участка предполагаются условия, соответствующие условиям зарождения талика, поэтому температура на поверхности считается равной 0°C . За пределами ТК на поверхности

задается фоновая отрицательная среднегодовая температура многолетнемерзлых пород. Глубинный поток тепла в силу своей малости может не учитываться.

Для определения величины нисходящего теплопотока в центре ТК в рассмотренной выше постановке в принципе достаточно решений для двух форм ТК — в форме круга и прямоугольника. В первом случае задача является двухмерной осесимметричной, во втором — трехмерной. Частным случаем второй задачи является решение при бесконечной длине одной из сторон прямоугольника — т.е. двухмерная задача для полосы неограниченной длины. При необходимости могут быть получены решения и для ТК произвольной формы и даже при наличии нескольких взаимодействующих ТК по методике, предложенной в работе [1], однако следует отметить высокую трудоемкость такого вычисления.

Плотность нисходящего теплового потока в центре ТК круглой формы составляет

$$q_T = \lambda_m \left. \frac{dt(z)}{dz} \right|_{z=0, r=0} = \frac{\lambda_m |t_{\Pi}|}{r_T}, \quad (11)$$

для контура *прямоугольной* формы

$$q_T = \lambda_m \left. \frac{dt(x, z)}{dz} \right|_{x=0, y=0, z=0} = \frac{2\lambda_m |t_{\Pi}|}{\pi} \sqrt{\frac{1}{b^2} + \frac{1}{a^2}}, \quad (12)$$

и для контура-полосы при $a \rightarrow \infty$

$$q_T = \lambda_m \left. \frac{dt(x, z)}{dz} \right|_{x=0, z=0} = \frac{2\lambda_m |t_{\Pi}|}{\pi \cdot b}, \quad (13)$$

где λ_m — теплопроводность мерзлых пород; t_{Π} — среднегодовая температура пород на окружающей контур территории; r_T — радиус круглого ТК; a — полудлина прямоугольного контура; b — полуширина прямоугольного ТК или ТК в форме бесконечной полосы.

Таким образом, определив по зависимостям (11—13) величину теплового потока от поверхности в центре ТК, можно по зависимости (9) оценить величину годового промерзания пород снизу, которая, согласно уравнению (10), представляет собой разницу между потенциальными глубинами летнего оттаивания и зимнего промерзания сверху. Это позволяет найти критическое значение любого из параметров природной среды (зимнего или летнего), влияющего на температурный режим пород и приводящее к началу многолетнего оттаивания пород в центре небольших контуров приложения дополнительной тепловой нагрузки. Сравнение результатов оценки и прогнозирования условий формирования таликов относительно малых размеров в плане по приведенным выше зависимостям с данными, полученными в ходе численного моделирования данной задачи на ПЭВМ, показали вполне удовлетворительную точность предлагаемого аналитического метода.

Для примера рассмотрим ограниченный по площади участок поверхности, где в силу естественных (понижение в рельефе, наличие высокого кустарника, ветровая тень и пр.) или техногенных причин происходит повышенное снегонакопление. Поперечные размеры участка составляют около 15 м. Необходимо оценить возможность формирования теплового талика в данных условиях. Строение верх-

ней части разреза двухслойное — до глубины 0,4 м залегает влажный торф, ниже — супеси. На поверхности развит маломощный (0,05 м) мохово-лишайниковый покров. Среднегодовая температура пород на окружающей территории составляет $t_{\text{п}} = -4,0$ °С. Остальные параметры следующие: $\Omega_{\text{п}}^{\text{п}} = 30\,000$, $\Omega_{\text{з}}^{\text{п}} = -100\,000$ °С·час; $\lambda_{\text{т}1} = 0,8$, $\lambda_{\text{т}2} = 1,2$, $\lambda_{\text{м}1} = 1,8$, $\lambda_{\text{м}2} = 1,5$ Вт/(м·°С); $Q_{\text{ф}1} = 48\,000$, $Q_{\text{ф}2} = 16\,000$ (Вт час)/м³, $R_{\text{п}}^{\text{п}} = R_{\text{п}}^{\text{з}} = 0,2$ (м²·°С)/Вт; $m_1 = 0,4$ м.

Вначале для сравнения найдем величину критического сопротивления снега для случая неограниченного размера контура теплового возмущения. Глубина потенциального летнего оттаивания из (1 а) составит $\xi_{\text{л}} = 1,54$ м, а критическое термическое сопротивление снега согласно (3) имеет величину $\bar{R}_{\text{сн.кр}}^0 = 2,12$ (м²·°С)/Вт.

Если ТК имеет форму круга с радиусом 7,5 м, то плотность нисходящего теплового потока в центре контура из (11) будет $q_{\text{т}} = 0,8$ Вт/м², мощность слоя годового промерзания снизу из (9) составит $\xi_{\text{нт}} = 0,44$ м, а необходимая для зарождения талика мощность слоя зимнего промерзания пород сверху согласно (10) равна $\xi_{\text{зв}} = 1,1$ м. Поскольку выполняется условие $\xi_{\text{зв}} > m_1$, задача является действительно двухслойной и формула (1 а) применена правильно. Подставив найденную величину $\xi_{\text{зв}}$ вместо $\xi_{\text{л}}$ в формулу (3), найдем критическую величину термического сопротивления в центре круглого участка повышенного снегонакопления диаметром 15 м $\bar{R}_{\text{сн.кр}}^{\text{т}} = 2,87$ (м²·°С)/Вт. Относительное увеличение теплоизолирующего слоя снега, необходимое для начала развития талика, в результате теплового влияния окружающих многолетнемерзлых пород составило 33%, что является вполне заметной величиной.

Проделав аналогичные расчеты для ТК квадратной формы со стороной 15 м и для бесконечной полосы той же ширины, получим критические величины термического сопротивления снега $\bar{R}_{\text{сн.кр}}^{\text{т}}$ для центров этих контуров соответственно 2,77 и 2,55 (м²·°С)/Вт. Таким образом, наибольшее тепловое влияние окружающих мерзлых пород на условия образования талика наблюдается в круговых ТК, наименьшее — в вытянутой полосе. Это естественно, так как в случае кругового участка окружающие мерзлые породы оказываются в целом максимально приближены к его центру, а в случае участка-полосы отток тепла в окружающие породы происходит вообще только перпендикулярно ее оси.

Оценочные расчеты можно выполнять на любых калькуляторах, особенно просты оценки в случае однородного по вертикали строения геологического разреза. Предлагаемый в работе метод оценки устойчивости ММП позволяет достаточно уверенно прогнозировать возможные последствия воздействия различных техногенных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балобаев В.Т., Шасткевич Ю.Г. Расчет конфигурации таликовых зон и стационарного температурного поля под водоемами произвольной формы // Озера криолитозоны Сибири. — Новосибирск: Наука, 1974.

- [2] *Булдович С.Н.* Особенности прогнозирования изменений среднегодовой температуры и глубины сезонного оттаивания (промерзания) горных пород // Основы геокриологии. Ч. 6: Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне. — М.: Изд-во МГУ, 2008.
- [3] *Хрусталева Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Яковлев С.В.* Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM: Свидетельство № 940281. РосАПО, 1994.
- [4] *Шур Ю.Л.* Термокарст. — М.: Недра, 1977.

ESTIMATION OF STABILITY PERMAFROST ROCKS AGAINST TECHNOGENIC ATTACK DURING MASTERING THE NORTH TERRITORY OF RUSSIA

S.N. Buldovich

Geological faculty
Moscow State University
Vorobjevy gory, Moscow, Russia, 119899

In this work is presented method drawn near accounting estimation of the influence technogenic factors on geocryological conditions and possibility of the begining disturbance of permafrost rocks. The Discriminating devil of the proposed method is a possibility of its using for a small area of heat technogenic attack with the different form and under flaky construction in top strata of the rocks.

Key words: heatturn, permafrost, thermal parameters of rocks, modern exogenic geocryological processes, seasonal thawing layer, seasonal frozen layer, numerical mathematical simulation.