

ПРОГНОЗ ОТТАИВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ И ИЗМЕНЕНИЯ КРИОГЕННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ГРУНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

С. Е. Гречищев

Институт Криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия

Предложен геосистемный подход к прогнозу фоновых геокриологических процессов и соответствующие упрощенные расчетные методы, результаты которых могут быть отражены на прогнозных мелкомасштабных картосхемах. Выполнены расчеты и составлены прогнозные (до 2025 г.) мелкомасштабные картосхемы распределения и оттаивания вечной мерзлоты и изменения криогенного растрескивания грунтов на территории России в условиях глобального потепления климата. Прогноз выполнен для типов урочищ, сложенных с поверхности торфяными, глинистыми и песчаными грунтами. Выделены области предполагаемой деградации и предполагаемой устойчивости вечной мерзлоты для урочищ разных типов, а также области предполагаемого затухания криогенного растрескивания.

Вечная мерзлота, оттаивание, геосистема, криогенное растрескивание, потепление климата, прогноз

PREDICTION OF PERMAFROST THAWING AND DISTRIBUTION AND CHANGES OF FROST SOIL CRACKING FOR THE TERRITORY OF RUSSIA UNDER CLIMATE WARMING

S.E. Grechishchev

Institute of Earth's Cryosphere, 625000, Tyumen, P.o. 1230, Russia

Geosystematical foundations and simplyfied calculations for geocriological processes predictions are proposed. The predicted results are supposed to be shown on the small scale map-schemes. The available calculations (up to date 2025 year) and small scale map-schemes of predicted permafrost thawing and distribution and changes of cryogenic soil cracking within Russia under global climate warming were carried out. The prediction is fulfilled for peaty, clayey and sandy stow types. The zones of degradating and stable permafrost for different stow types and frost soil cracking decreasing area are distinguished within the territory of Russia.

Permafrost, thawing, geosystem, cryogenic soil cracking, global climate warming, prediction

ВВЕДЕНИЕ

Начавшееся глобальное потепление климата приведет в зоне вечной мерзлоты к изменению теплообмена на земной поверхности и, как следствие, к сдвигке физико-химического равновесия во всей толще многолетнемерзлых пород. Это будет сопровождаться различными геокриологическими процессами, развитие которых в большинстве случаев представляет опасность для хозяйственной деятельности. Подчеркнем, что речь идет о фоновых процессах, которые, вообще говоря, развиваются гораздо медленнее и незаметнее, чем нефоновые геологические процессы, вызываемые непосредственным воздействием инженерной деятельности на геологическую среду и которые для удобства будем называть геокриотехногенными.

Что касается геокриотехногенных процессов, методы их прогноза интенсивно развиваются и находятся в непосредственной связи с типами инженерных сооружений, их вызывающих. К ним же относятся и геокриологические процессы,

возникающие вследствие строительных нарушений поверхностных покровов (почвенного, растительного, снежного и др.). Необходимость их прогноза очевидна, а методы прогноза рассматривались нами ранее неоднократно [Гречищев и др., 1982; 1983; Мельников и др., 1992].

Фоновые же геокриологические процессы развиваются под влиянием гидрометеорологических факторов на территориях, не затронутых непосредственным хозяйственным воздействием. Они протекают в условиях квазиравновесия пород с окружающей средой как результат малых отклонений от него и сами по себе являются выражением непрерывной эволюционной подстройки геологической среды к более мобильным водной и воздушной средам. Целесообразность заблаговременного прогноза фоновых процессов диктуется природоохранными целями, а также возможным воздействием процессов на инженерные сооружения. Так, например, потепление вечной мерзлоты может вызвать разру-

шение зданий, построенных с сохранением мерзлоты в основании. Прекращение растрескивания грунтов улучшит условия эксплуатации дорог, земляных плотин, зданий и т.д.

Общий оценочный геокриологический прогноз производился различными авторами на протяжении последних лет неоднократно.

В работе [Anisimov, 1989], являющейся первой попыткой прогноза возможного распределения вечной мерзлоты на территории России в условиях глобального потепления климата, на основе палеореконструкции и палеогеографических аналогий приведено возможное положение южной границы вечной мерзлоты в будущем. Согласно этому прогнозу площадь российской вечной мерзлоты сократится более чем вдвое. Однако не указано, что речь идет о границах вечной мерзлоты для стационарных условий, которые могут наступить через тысячу или несколько сот лет. Естественно, что такой гиперпрогноз, давая, может быть общепланетарную тенденцию, представляющую интерес для отдаленных поколений, не дает возможность оценить степень опасности начавшегося потепления климата для вечной мерзлоты на период, представляющий непосредственный практический интерес, т.е. на ближайшие 30—50 лет.

В работе [Brown, 1994] обобщены прогнозные геокриологические построения с географических позиций и представлен качественный бессрочный географический прогноз, описывающий концептуально развитие возможных фоновых морфогенетических деструктивных процессов. В работе обозначена общая тенденция. В ней отсутствует прогноз строения мерзлоты, ареалов и возможной интенсивности процессов, не учтена связь типов процессов с возможным строением мерзлоты, не указана срочность прогноза.

В настоящей работе для практических целей начата разработка оценочного количественного прогноза фоновых геокриологических процессов в связи с ожидаемым потеплением климата на срок около 30 лет, т.е. примерно до 2025 г. Прогнозируемыми параметрами являются: глубина и скорость оттаивания многолетнемерзлых пород, примерное положение ареалов отрыва кровли многолетнемерзлых пород от подошвы сезонного промерзания, изменение ареалов и глубины криогенного растрескивания грунтов. Криогенное растрескивание как один из геокриологических процессов, подлежащих прогнозу, было выбрано в качестве первого этапа работы в связи с хорошей развитостью необходимых для прогноза расчетных методов.

ОБЩИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

При прогнозе обозначенных выше фоновых геокриологических процессов приняты следующие условия, ограничения и упрощения.

Прогнозный период принят равным 30 лет, т.е. примерно до 2025 г.

Сценарий возможного потепления климата и повышения температуры поверхности почвы принят согласно анализу, выполненному А.В.Павловым (см. его статью в настоящем номере журнала). Согласно этому сценарию в течение прогнозного периода на территории России среднегодовая температура воздуха плавно поднимается на 1—1,5 °С, а толщина снежного покрова увеличивается на 25%.

Принято, что почвенный, растительный и снежный покровы не подвергаются прямому техногенному разрушению, поскольку речь идет о фоновых процессах.

Использован принцип иерархии природных геосистем для интерпретации прогнозных изменений, в соответствии с которым большие геосистемы — ландшафты, местности — состоят из меньших геосистем: урочищ и фаций. Последние характеризуются однородным литологическим строением приповерхностных грунтов, подразделенных нами по их способности к промерзанию — оттаиванию и к другим геокриологическим процессам на торфяные, глинистые и песчаные. Скальные, полускальные и крупносkeletalные грунты, а также геосистемы, их включающие, не рассматривались. Также не рассматривались водные геосистемы, поскольку прямые наблюдения происходящих в них геокриологических процессов не проводились, а соответствующие физико-математические расчетные модели практически не разработаны.

Общим принципом является предположение о „гладкости развития“ геосистем в течение рассматриваемого 30-летнего периода под влиянием постепенного потепления климата, т.е. проблема возможной катастрофической потери устойчивости геосистемами не рассматривается. Это — большая актуальная научная проблема, требующая для своего решения разработки соответствующей теории и математических имитационных моделей криогенных геосистем.

В качестве исходной базы данных, необходимых для схематических прогнозных расчетов и построений мелкомасштабных картосхем, принята информация, содержащаяся на мелкомасштабных (1 : 25 000 000) картах „Атласа СССР“ (изд. ГУГК, М., 1984).

ОТТАИВАНИЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Ниже приводится схематический прогноз изменения положения границы вечной мерзлоты и скоростей ее оттаивания, т.е. „отрыва“ кровли вечной мерзлоты от подошвы сезонно-промерзающего слоя, в торфяных, глинистых и песчаных урочищах. Эти границы сравниваются с современными границами вечной мерзлоты. На основании прогнозных расчетов представлено схе-

матическое районирование прогнозной геокриологической ситуации.

Положение южной границы вечной мерзлоты в грунтах заданного состава может быть найдено приближенно по изолинии, определяемой выражением

$$\chi = (\lambda_{fr}/\lambda_{th}) \cdot (-J_w^{(surf)})/J_s^{(surf)} = 1, \quad (1)$$

где χ — отношение глубины сезонного промерзания к глубине сезонного оттаивания; λ_{fr} , λ_{th} — коэффициенты теплопроводности грунта в мерзлом и талом состоянии; $J_w^{(surf)}$, $J_s^{(surf)}$ — индексы зимних и летних температур поверхности почвы, °С·мес.

Для приближенных расчетов приняты следующие средние показатели теплофизических свойств грунтов:

— торф $w = 3,0$; $\gamma_{sk} = 300$ кг/м³; $\lambda_{th} = 0,8$ Вт/м·град;

$\lambda_{fr} = 1,12$ Вт/м·град;

— глинистые грунты $w = 0,25$; $\gamma_{sk} = 1700$ кг/м³; $\lambda_{th} = 2,1$ Вт/м·град; $\lambda_{fr} = 2,5$ Вт/м·град;

— песок $w = 0,15$; $\gamma_{sk} = 1600$ кг/м³;

$\lambda_{th} = 1,6$ Вт/м·град; $\lambda_{fr} = 1,9$ Вт/м·град,

где w — влажность; γ_{sk} — плотность скелета грунта.

Индексы температур поверхности рассчитываются по следующим приближенным формулам:

$$J_w^{(surf)} \approx (5/6) \cdot T_{m,w}^{(surf)} \cdot t_w, \quad (2)$$

$$J_s^{(surf)} \approx (5/6) \cdot T_{m,s}^{(surf)} \cdot t_s,$$

где t_w и t_s — продолжительность периодов зимних (отрицательных) и летних (положительных) температур поверхности;

$T_{m,w}^{(surf)}$ и $T_{m,s}^{(surf)}$ — физические амплитуды зимних и летних температур поверхности.

Значения t_w и t_s определяются на основе карты дат наступления температуры воздуха, равной 0 °С, весной и осенью.

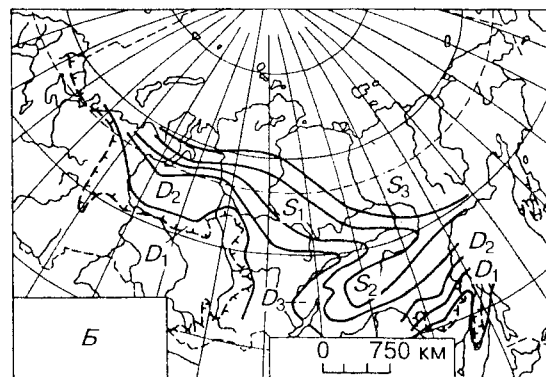
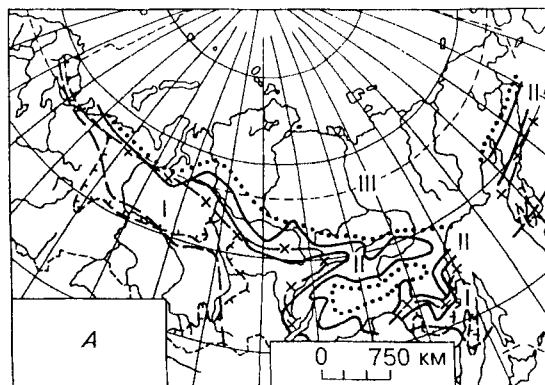
Значения $T_{m,w}^{(surf)}$ и $T_{m,s}^{(surf)}$ рассчитываются по следующим эмпирическим формулам [Гречищев и др., 1982; 1983]:

$$T_{m,w}^{(surf)} = T_{m,w}^{(air)} / (1 + 3 \cdot H_s), \quad (3)$$

$$T_{m,s}^{(surf)} = K \cdot T_{m,s}^{(air)}, \quad (4)$$

где $T_{m,w}^{(air)}$, $T_{m,s}^{(air)}$ — физические амплитуды зимних и летних температур воздуха; H_s — зимний максимум толщины снежного покрова, м; $K = 1,1$ для песков и $K = 1,2$ для глин и торфа [Гречищев и др., 1983].

Значения $T_{m,w}^{(air)}$ принимается равным среднеянварской температуре воздуха по карте из „Атласа СССР“. Значение $T_{m,s}^{(air)}$ принимается равным среднеиюльской температуре по соответствующей карте из того же атласа. Значение H_s принимается по карте снежного покрова из того же атласа.



1 — 2 — 3 — 4

Рис. 1. Современное (А) и прогнозируемое через 30 лет (Б) распределение вечной мерзлоты.

I — островное, II — прерывистое, III — сплошное. 1 — современная южная граница вечной мерзлоты; 2, 3, 4 — расчетные современные южные границы вечной мерзлоты в торфяных, глинистых и песчаных грунтах, соответственно. Остальные усл. обозн. см. в тексте.

Для каждого типа грунта, основываясь на приведенных формулах (1)—(4) и картографических данных, был рассчитан коэффициент χ и установлено положение изолинии $\chi = 1$, которая, по определению, представляет собой южную границу вечной мерзлоты для данного типа грунта.

На рис.1 нанесены рассчитанные современные южные границы вечной мерзлоты в торфяных, глинистых и песчаных грунтах. На том же рисунке показаны современные границы островной, прерывистой и сплошной вечной мерзлоты. Как следует из рисунка, южная граница промерзания торфяных грунтов приблизительно совпадает с южной границей вечной мерзлоты, южная граница промерзания глинистых грунтов приблизительно совпадает с южной границей прерывистой мерзлоты, а южная граница промерзания песков совпадает с южной границей сплошной мерзлоты.

Это позволяет дать геосистемную интерпретацию таким терминам как „островная“, „прерывистая“ и „сплошная“ мерзлота. „Островная“ мерзлота — та территория, где торфяные урочища являются мерзлыми, а глинистые и песчаные урочища в основном немерзлые. „Прерывистая“ мерзлота — территория, где промерзают торфяные и глинистые урочища, а песчаные в основном остаются немерзлыми. „Сплошная“ мерзлота — территория, где промерзают все типы урочищ, включая песчаные.

В действительности „южные границы“ мерзлоты для каждого типа грунта должны быть весьма приблизительны из-за долговременных флюктуаций климатических параметров. В связи с этим для каждого типа грунта должен существовать свой район перелетков с соответствующей частотой промерзания. Задача определения таких районов здесь не рассматривается.

Прогноз положения южных границ вечной мерзлоты для грунтов различного состава под влиянием глобального потепления проводится по тем же формулам (1)—(4). В последних сценарий потепления к 2025 г. несколько детализирован, согласно данным А.В.Павлова, а именно:

— физическая амплитуда зимних температур воздуха будет теплее современной на 2-4 градуса;

— физическая амплитуда летних температур воздуха будет теплее современной на 1,5 градуса.

В остальном схема построения изолиний χ и метод определения границ по условию $\chi = 1$ остаются прежними.

Для прогноза оттаивания вечной мерзлоты в грунтах различного состава вводятся следующие дополнительные предположения:

— среднегодовая температура поверхности грунта будет расти во времени везде с примерно постоянной в среднем скоростью;

— для данного типа грунта глубина его оттаивания к 2025 г. (т.е. глубина кровли вечной мерзлоты) будет уменьшаться по мере продвижения вглубь области вечной мерзлоты линейно от максимального значения на ее южной современной границе, занимающей положение x_0 , до нуля на ее южной будущей границе, занимающей через 30 лет положение x_{30} , где x — координата по нормали к границам;

— геосистемное строение вечной мерзлоты, выражающееся в существовании „переходного“ и „промежуточного“ слоев, в прогнозных расчетах не учитывается.

Введенные упрощения позволяют сделать следующие оценки оттаивания вечной мерзлоты.

Южные границы многолетнего промерзания грунтов разных типов движутся вглубь территории вечной мерзлоты с постоянной средней скоростью и поэтому дата „отрыва“ кровли вечной мерзлоты от подошвы слоя сезонного про-

мерзания в грунте данного типа в точке с координатой x может быть рассчитана по следующей приближенной формуле:

$$T_a \approx 30 \cdot x / x_{30}, \text{ годы}, \quad (5)$$

где x — расстояние точки от современной южной границы вечной мерзлоты в грунте данного типа.

Средняя многолетняя скорость оттаивания вечной мерзлоты V_{pf} после ее „отрыва“ от подошвы сезонномерзлого слоя определяется по формуле [Гречицев и др., 1982]:

$$V_{pf} = (\lambda \cdot \langle V_T^{(surf)} \rangle / (L \cdot w))^{1/2}, \quad (6)$$

где V_{pf} — среднемноголетняя скорость оттаивания вечной мерзлоты (м/год), $\langle V_T^{(surf)} \rangle$ — среднемноголетняя скорость повышения среднегодовой температуры поверхности грунта (град/год).

Толщина слоя „отрыва“ кровли вечной мерзлоты от подошвы сезоннопромерзающего слоя определяется выражением:

$$H = V_{pf} \cdot (t - t_a), \quad t > t_a \quad (7)$$

На южной границе мерзлоты $t_a = 0$ и, следовательно, $H = H_{\max}$, где H_{\max} — максимальный „отрыв“ кровли вечной мерзлоты от подошвы сезоннопромерзающего слоя.

Величина $\langle V_T^{(surf)} \rangle$ оценивается по формуле:

$$\langle V_T^{(surf)} \rangle \approx T_{30}^{(surf)} / 30, \text{ град/год}, \quad (8)$$

где $T_{30}^{(surf)}$ — прогнозное увеличение среднегодовой температуры поверхности грунта через 30 лет (т.е. к 2025 г.).

Повышение среднегодовой температуры поверхности грунта на основании сделанных предположений и вышеприведенных формул может быть оценено от 0,5 до 1,2 градуса для всей территории мерзлоты. Поэтому

$$\langle V_T^{(surf)} \rangle = 0,016 \text{ до } 0,040 \text{ град/год.}$$

Таким образом, используя данные о свойствах грунтов, по формулам (6) и (7) можно получить следующие средние прогнозные оценки:

— в торфе $V_{pf} = 0,05$ м/год, $H_{\max} = 1,5$ м;

— в глинистых грунтах $V_{pf} = 0,10$ м/год, $H_{\max} = 3,0$ м;

— в песках $V_{pf} = 0,14$ м/год, $H_{\max} = 4,2$ м.

Полученные оценки совпадают примерно с обобщенными результатами, приведенными в работе [Brown, 1994], но более детализированы и связаны с геосистемами. Если учесть в расчетах влияние „переходного“ и „промежуточного“ геосистемных слоев, то возможно, что приведенные цифры могут уменьшиться на 10—20%.

Обобщая результаты прогнозных расчетов, отметим, что на территории криолитозоны России выделяются две крупные области (рис. 1, Б): S — зона условно стабильной вечной мерзлоты и D — зона ее потенциальной деградации, с тремя подзонами в каждой. Введенные условные на-

звания означают, что если потепление продолжится только до 2025 г., а затем условия не будут изменяться неограниченно долго, то через длительный период времени (может быть тысячи лет) в области *D* вечная мерзлота оттаит во всех типах грунтов, а в области *S* мерзлота либо частично, либо полностью сохранится.

Подзоны, выделенные на рис.1, *B*, имеют следующий смысл:

*D*₁ — полное оттаивание вечной мерзлоты к 2025 г.;

*D*₂ — среднее оттаивание: песчаные и глинистые урочища остаются в основном немерзлыми; в торфяных урочищах кровля мерзлоты понижается, ее „отрыв“ начинается в настоящее время, величина „отрыва“ к 2025 г. составит от 1,5 до 0,5 м;

*D*₃ — слабое оттаивание: песчаные урочища остаются в основном немерзлыми; в глинистых урочищах кровля мерзлоты понижается, „отрыв“ начинается в настоящее время, значения „отрыва“ к 2025 г. составят от 3 до 1,5 м; в торфяных урочищах кровля мерзлоты понижается, начало „отрыва“ через 15 лет, величина слоя „отрыва“ к 2025 г. от 0,5 м до 0;

*S*₁ — островная мерзлота: в песчаных урочищах кровля мерзлоты понижена, начало „отрыва“ в настоящее время, „отрыв“ к 2025 г. от 4,2 до 2,2 м; в глинистых урочищах кровля мерзлоты понижена, начало „отрыва“ через 10 лет, „отрыв“ к 2025 г. от 1,7 до 0; торфяные урочища останутся мерзлыми;

*S*₂ — зона прерывистой мерзлоты: в песчаных урочищах кровля мерзлоты понижена, начало „отрыва“ через 15 лет, „отрыв“ к 2025 г. от 2 м до 0; в глинистых и торфяных урочищах мерзлота остается;

*S*₃ — зона сплошной мерзлоты: во всех типах урочищ мерзлота сохраняется.

Во всех описанных районах температура грунта на глубине 10 м повысится, что требует специальных прогнозных оценок, не являвшихся задачей данной работы.

КРИОГЕННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ

Прогноз криогенного растрескивания выполнен на основе методики, изложенной в работе [Гречищев и др., 1982]. Входные данные в расчетную методику состоят из: (а) климатических данных, включая температуры воздуха и снежный покров, (б) свойств грунтов, включая физические, тепло-физические и механические.

Глубина снежного покрова принималась по многолетним метеорологическим данным из „Климатического справочника. Климат СССР“.

Плотность снега принималась по эмпирической формуле:

$$\rho_s = \begin{cases} 150 + 250 \cdot h_s, & 0 < \tau < 0,8 \cdot T_{win} \\ h_s^{max} \cdot (0,2 + \tau/T_{min}), & 0,8 \cdot T_{win} \leq \tau \leq T_{win} \end{cases} \quad (9)$$

где ρ_s — плотность снега, h_s — глубина снега, м; h_s^{max} — максимальная глубина снега, м; τ — время; T_{win} — продолжительность зимы.

Теплопроводность и теплоемкость снега рассчитываются по эмпирическим формулам:

$$C_s \approx 2,1 \cdot 10^3 \cdot \rho_s, \quad \lambda_s \approx 0,93 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_s,$$

где C_s — теплоемкость снега, Дж/м³·К, ρ_s в кг/м³; λ_s — теплопроводность снега, Вт/м·К.

Показатели механических и теплофизических свойств мерзлых грунтов приняты осредненными для каждого типа грунта — торфяного, глинистого, песчаного — по табличным данным, приведенным в работе [Гречищев и др., 1982].

Для вычисления вероятной скорости роста полигонально-жильного льда можно использовать следующее выражение:

$$v = \Delta \cdot T \cdot p, \quad (10)$$

где v — толщина ледяного клина через T лет, Δ — толщина элементарной (годовой) жилки льда, p — частота растрескивания.

В последней формуле период T задан, значение определяется расчетом. Что же касается частоты растрескивания p , то ее определение производится на основании следующих соображений. В связи с тем, что криогенное растрескивание происходит при понижении температуры поверхности ниже критического значения, частота растрескивания p должна определяться как частное от деления числа зим с температурой поверхности ниже критической, N , на число всех наблюдаемых зим, N_u , т.е.

$$p = (N(|t| > |t_{cr}|))/N_u, \quad (11)$$

где $|t|$ абсолютное значение минимальной температуры поверхности под снегом в °С, $|t_{cr}|$ — абсолютное значение температуры, критической по условию растрескивания.

Расчет $|t_{cr}|$ может производиться приближенно из уравнения, выражающего равенство температурных напряжений прочности на разрыв, т.е.

$$(E(t) \cdot \delta(t))/(1 - \nu) = \sigma(t), \quad (12)$$

где E , ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона; δ — температурная деформация; σ — прочность на разрыв; t — температура поверхности.

Таблица 1. Критические температуры растрескивания $|t_{cr}|$

Грунт	Песок	Глинистые грунты	Торф
$ t_{cr} $	20	14	12

Таблица 2. Среднемесячные температуры воздуха (°С) в п. Амдерма для „теплой“ и „холодной“ зим

Стандарт	Месяц									
	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	
„Теплая“ (1983)	-1,9	-10,3	-14,8	-16,3	-19,5	-17,2	-13,6	-6,6	+1,8	
„Холодная“ (1985)	-2,7	-9,3	-20,1	-25,1	-25,1	-13,5	-14,5	-6,6	+2,6	

Таблица 3. Среднегодовое количество снежного покрова в п. Амдерма

Глубина снега, м	Месяц									
	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	
	0	0,09	0,17	0,25	0,28	0,30	0,29	0,27	0	

Таблица 4. Повторяемость минимальных зимних температур поверхности грунта |t|, °С в п. Амдерма

Частота	6—8	8—10	10—12	12—14	14—16	16—18	18—20
	0,07	0,14	0,21	0,37	0,14	0,07	0

Таблица 5. Частота растрескивания типов грунтов р-на п. Амдерма

Частота растрескивания	Песок	Глинистый грунт	Торф
	0	0,07	0,20

Таблица 6. Повторяемость зимних минимальных температур поверхности р-на Бованенково

Повторяемость	-3—-5	-5—-7	-7—-9	-9—-11	-11—-13	-13—-15	-15—-17	-17—-19	-19—-21	-21—-23	-23—-25	-25—-27
	0,12	0,22	0,20	0,07	0,08	0,07	0,17	0,03	0,015	0,01	0,01	0,005

Результаты расчетов по формуле (12) представлены в табл. 1.

Минимальная температура поверхности под снегом |t| определялась по эмпирической формуле:

$$|t| \approx |t_a| / (1 + 4 \cdot H). \quad (13)$$

Таким образом, частота возникновения величины |t| зависит от климатических флюктуаций температуры воздуха и толщины снежного покрова, которые вычислялись по данным „Климатического справочника. Климат СССР“.

В качестве примера приведем результаты прогноза для двух пунктов: (а) п. Амдерма и (б) п-ов Ямал (Бованенково).

Зимние температуры воздуха для района п. Амдерма задавались для двух типов зим: „холодной“ и „теплой“. Среди наблюденного многолетнего ряда зима 1984—85 гг. была определена как стандарт „холодной“, а 1982—83 гг. как стандарт „теплой“. Значения среднемесячных температур воздуха приведены в табл. 2.

Согласно расчетам ширина раскрытия трещин в конце зимы составляет около 2 мм и может служить базой для роста элементарных ледяных

жилок такой же ширины. Расстояние между этими трещинами будет 15—20 м, что примерно соответствует фактическим наблюдениям.

Практические расчеты позволили определить частоту возникновения данной температуры поверхности |t| для района п. Амдерма (см. табл. 4).

Сравнивая табл. 4 и 1, можно определить частоту растрескивания грунтов в районе п. Амдерма (табл. 5)

Второй пример расчетов приведен для р-на Бованенково на п-ве Ямал. Используя ту же методику, определим вероятность минимальных зимних температур поверхности за тот же самый 25-летний период (табл. 6).

Сравнивая табл. 6 и 1, определим современную частоту растрескивания типов грунтов р-на Бованенково (табл. 7)

Аналогичные расчеты произведены для других районов.

Для прогноза ареалов растрескивания нанесем изолинии минимальных зимних температур поверхности на картосхему. Границы растрескивания для грунтов различного типа будут тогда соответствовать изотермам критических температур из табл. 1, т.е. для торфа — вдоль изотермы -12 °С, для глинистых грунтов — вдоль изотермы -14 °С, для песчаных — вдоль изотермы -20 °С. Районы современного растрескивания показаны на рис. 2, А.

Точно таким же способом, но только основываясь на расчетных прогнозных значениях ми-

Таблица 7. Частота растрескивания типов грунтов р-на Бованенково

Частота растрескивания	Песок	Глинистые грунты	Торф
	0	0,20	0,30

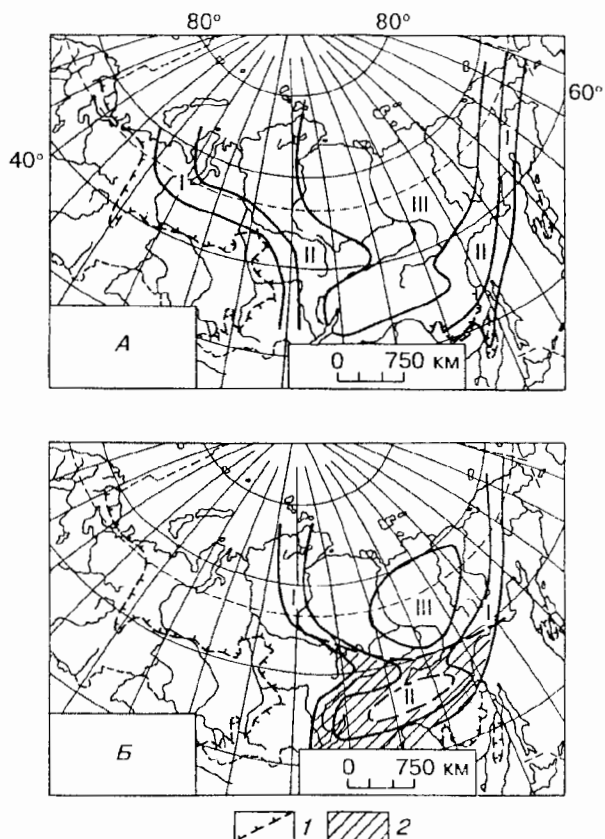


Рис. 2. Области криогенного растрескивания в современных условиях (А) и в условиях, ожидаемых через 30 лет (Б).

I — в торфе (в глинистых и песчаных грунтах растрескивание не происходит), II — в торфе и глинистых грунтах (в песчаных грунтах растрескивание не происходит), III — растрескивание происходит во всех типах грунтов. 1 — южная граница современной вечной мерзлоты, 2 — область с развитием криогенных трещин только в пределах слоя сезонного промерзания.

нимальных зимних температур поверхности грунта, могут быть определены районы растрескивания, ожидаемые через 30 лет, т.е. к 2025 г. Они показаны на рис. 2, Б.

В обоих случаях (т.е. для рис.2, А, Б) границы соответствуют частоте растрескивания 0,2—0,3. Сравнение рис.2, А и 2, Б показывают, что к 2025 г. следует ожидать сильное сокращение ареалов растрескивания. На больших пространствах в естественных условиях оно прек-

ратится полностью. В частности, это относится к п-ву Ямал. На рис. 2, Б выделена большая зона, где растрескивание грунтов в области вечной мерзлоты будет сводиться только к растрескиванию сезонномерзлого слоя, поскольку здесь в 2010—2015 гг. начнется „отрыв“ кровли вечной мерзлоты от подошвы сезоннопромерзающего слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная реалистическая оценка возможных изменений в распределении вечной мерзлоты показывает, что к 2025 г. ее полное оттаивание и исчезновение возможно лишь в полосе шириной около 100 км вдоль ее современной южной границы, что составляет незначительную долю от ее современной территории. Однако ощутимые изменения температуры, строения вечной мерзлоты и проявления геокриологических процессов захватят почти половину территории ее распространения. Это свидетельствует о необходимости и целесообразности разработки более детального прогноза, а также введения в действующие нормативные документы, регламентирующие проектирование и строительство, требования учета прогнозного состояния вечной мерзлоты.

В заключение автор выражает благодарность за содействие данной работе Национальному научному Фонду США и Международной Ассоциации мерзловедения.

Литература

Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. и др. Методические рекомендации по прогнозу криогенных физико-геологических процессов. М., ВСЕГИНГЕО, 1982, 110 с.
 Гречищев С.Е., Шур Ю.Л., Москаленко Н.Г. и др. Геокриологический прогноз Западно-Сибирской газоносной провинции. Новосибирск, Наука, 1983, 386 с.
 Мельников Е.С., Гречищев С.Е., Павлов А.В. и др. Изучение инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий верхних горизонтов пород в нефтегазоносных районах криолитозоны. Метод. руководство. М., Недра, 1992, 320 с.
 Anisimov O.A. Changing Climate and Permafrost Distribution in the Soviet Arctic // Physical Geography, 1989, 10(3), p.285—293.
 Brown R.J.E. Permafrost and Climate Change: the IPA Report to the IPCC // Frozen Ground. No. 15, June 1994, p.16—26.

Поступила в редакцию
7 января 1997 г.