

На правах рукописи

Белолуцкая Марина Арнольдовна

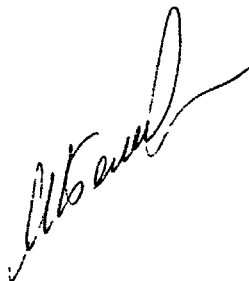
УДК 551.583:551.345(470-17+570-17)

**Влияние изменения климата на вечную мерзлоту
и инженерную инфраструктуру Крайнего Севера**

25.00.30 -Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2004



Работа выполнена в Государственном гидрологическом институте.

Научный руководитель - доктор географических наук О.А. Анисимов

Официальные оппоненты - доктор географических наук
С.П. Малевский-Малевич,
кандидат физико-математических
наук В.Е. Лагун

Ведущая организация - Институт Физики Атмосферы РАН

Защита состоится 24 марта 2004 г. в 14 часов на заседании
диссертационного Совета Д 327.005.01 по защитах диссертаций при
Государственном учреждении Главная геофизическая обсерватория
им. А.И. Воейкова по адресу: 194021, С.Петербург, ул. Карбышева, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Главной
геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.

Автореферат разослан 19 февраля 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
доктор географических наук

А. Мещер

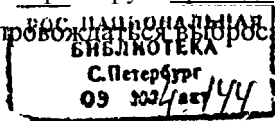
А.В. Мещерская

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Около 67% территории современной России расположено в районах распространения многолетнемерзлых пород, часто называемых вечной мерзлотой, температура которых, за исключением верхнего слоя сезонного протаивания, не поднимается выше 0 °С на протяжении двух или более последовательных лет. Все районы распространения многолетнемерзлых пород объединены понятием криолитозона. В криолитозоне имеется развитая городская и промышленная инфраструктура, отличительной чертой которой является то, что большинство сооружений построены на свайных фундаментах, использующих в качестве основания мерзлый грунт.

Климатическое потепление вызывает деградацию вечной мерзлоты, под которой понимается совокупность процессов, приводящих к увеличению температуры мерзлого грунта, более глубокому сезонному протаиванию и сокращению площади распространения приповерхностных многолетнемерзлых пород. Вместе с тем криолитозона, северные ландшафты и растительность обладают некоторой устойчивостью по отношению к воздействиям внешних факторов, и, в частности, климата. Имеющиеся в этой системе обратные связи частично компенсируют первоначальное воздействие до тех пор, пока оно не превышает порогового значения, по достижении которого система теряет устойчивость и переходит в новое состояние.

Потеря устойчивости криолитозоны связана со многими неблагоприятными социальными, экономическими и экологическими последствиями. В ближайшие несколько десятилетий изменение климата может привести к уменьшению прочностных свойств многолетнемерзлых грунтов, что, в свою очередь, вызовет уменьшение несущей способности фундаментов и повреждение или же разрушение построенных на них сооружений. Деформации и аварии трубопроводов, проходящих через вечную мерзлоту, могут сопровождаться выбросами в



окружающую среду нефтепродуктов. На неосвоенных участках криолитозоны могут развиваться деструктивные геоморфологические процессы, вызывая просадки грунта и значительно изменяя северные ландшафты и экосистемы. Возникающие при этом проблемы требуют незамедлительного и всестороннего изучения, поскольку они ставят под угрозу экологическую безопасность северных территорий. Устойчивость криолитозоны, ландшафтов и инженерной инфраструктуры районов Крайнего Севера в условиях глобального изменения климата являются предметами исследования данной диссертационной работы.

Целью исследований является разработка методологии оценки природных опасностей, связанных с деградацией многолетнемерзлых грунтов, и построение на ее основе прогностических карт, характеризующих геоэкологические риски для природных ландшафтов и инфраструктуры в области распространения вечной мерзлоты.

Были решены следующие конкретные задачи.

разработан метод оценки достоверности теоретических прогнозов климата для суб-Арктической области, основанный на построении эмпирической регрессионной модели и региональном сравнении получаемых с ее помощью результатов с расчетами по моделям общей циркуляции атмосферы и океана;

разработаны блоки динамической и стационарной моделей, учитывающие влияние изменения растительности на термический режим вечной мерзлоты и на снегонакопление в процессе потепления;

созданы базы климатических, почвенных и растительных данных, необходимые для проведения расчетов по моделям вечной мерзлоты в масштабе криолитозоны Северного полушария;

построены сценарии изменения растительного покрова в Арктике, соответствующие модельным сценариям изменения климата;

получены прогнозы изменения площади распространения и глубины сезонного протаивания вечной мерзлоты для одиннадцатилетних

интервалов времени вблизи 2030, 2050 и 2080 гг. по нескольким климатическим сценариям с учетом изменений растительности;

разработан метод прогноза опасностей, связанных с деградацией вечной мерзлоты, основанный на расчетном индексе;

построены прогностические карты геокриологических опасностей для природных ландшафтов и для инфраструктуры районов распространения вечной мерзлоты в условиях изменения климата.

Методы исследования. Перечисленные задачи решаются с использованием метода регрессионного анализа, метода математического моделирования и технологий Геоинформационных систем (ГИС). Отбор прогнозов изменения климата осуществляется путем сравнения с оценками, полученными по регрессионной эмпирической модели климата. ГИС-технологии используются для географической привязки различного рода данных, для пространственного обобщения результатов расчетов и для построения прогностических карт.

На защиту выносятся следующие положения.

Метод оценки адекватности теоретических прогнозов климата, основанный на построении регрессионной модели по данным длительных измерений температуры воздуха.

Динамическая и стационарная математические модели вечной мерзлоты, учитывающие обратные связи в системе атмосфера - снег — растительный покров — многолетнемерзлый грунт в регуляции воздействия изменения климата на термический режим и глубину сезонного протаивания мерзлых грунтов.

Метод-прогноза природных опасностей, связанных с деградацией вечной мерзлоты, основанный на расчетном индексе.

Прогностические карты геокриологических опасностей для природных ландшафтов и инфраструктуры районов распространения вечной мерзлоты для середины 21 века.

Научная новизна и личный вклад автора. Научная новизна результатов заключается в обосновании автором необходимости учета изменения свойств растительного покрова при прогнозе состояния вечной мерзлоты в условиях будущего климата; в создании стационарной и динамической моделей вечной мерзлоты, учитывающих динамику растительности; в создании баз данных, необходимых для проведения расчетов; в создании метода оценки геокриологических опасностей для природных ландшафтов и сооружений, построенных на вечной мерзлоте, и в построении прогностических карт индекса геокриологической опасности для середины 21 века.

Диссертационная работа является частью коллективных исследований, проводившихся в рамках двух научных проектов. Личный вклад автора проявлялся в сборе климатических, почвенных и растительных данных для криолитозоны северного полушария; анализе трендов изменения температуры воздуха и построении на их основе эмпирической модели климата; в разработке стационарной и динамической моделей вечной мерзлоты (блоков, учитывающих изменения растительного покрова и влажности грунта); в проведении расчетов, в которых оценивалось совместное влияние изменения климата и растительности на распространение и глубину сезонного протаивания вечной мерзлоты; в развитии метода количественной оценки геокриологических опасностей на основе расчетного индекса; в построении прогностических карт вечной мерзлоты и индекса геокриологической опасности для криолитозоны Северного полушария.

Практическое значение работы. Результаты научных исследований, полученные в диссертационной работе, использовались для подготовки Российских и международных справочных материалов, экспертных заключений и рекомендаций, связанных с изучением негативных последствий изменения климата в области распространения вечной мерзлоты, а также были предоставлены в качестве научного обоснования для выработки национальной позиции России по вопросу участия в международных соглашениях, направленных на ограничение антропогенного потепления.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на научных семинарах, Российских и международных совещаниях, важнейшими из которых являются ежегодная Международная конференция по геокриологии (Пушино, 1999 — 2003), Итоговая конференция по международной программе арктических исследований ACSYS (ноябрь 2003, С.Петербург), всемирная конференция по изменению климата (сентябрь 2003, Москва), восьмая международная конференция по проблемам вечной мерзлоты (июль 2003, Цюрих, Швейцария), конференция Европейского геофизического союза (апрель 2003, Ницца, Франция), первая Европейская конференция по вечной мерзлоте (апрель 2001, Рим, Италия), конференции Американского Геофизического Союза (декабрь 2000, 2001, 2003, Сан Франциско, США), международное совещание по проблемам загрязнения Арктики (июль 2000, Кэмбридж, Великобритания).

Публикации. Основные итоги научных разработок автора, представленные в диссертации, опубликованы в 6 статьях в журналах "Метеорология и Гидрология", "Физика Атмосферы и Океана", в сборнике "Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем", а также в трудах конференций и совещаний.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из трех глав, введения и заключения, содержит 24 рисунка и 7 таблиц, список цитируемой литературы состоит из 137 наименований.

1. Современные и ожидаемые в будущем изменения климата суб-Арктической области.

Современное изменение климата имеет глобальный характер и оказывает воздействие на многие природные процессы. Согласно большинству из имеющихся прогнозов, наиболее быстрым и значительным потепление будет в высоких широтах северного полушария, и, в частности в области распространения вечной мерзлоты. Для получения количественных оценок геокриологических последствий потепления необходимы прогнозы изменения климата в высоких широтах. Такие прогнозы могут быть получены различными методами.

В настоящее время большое распространение получили модели общей циркуляции атмосферы и океана. В контексте данной работы существенным является то, что многие современные модели, достаточно точно воспроизводя климат умеренных и низких широт, дают существенно различные оценки как современных климатических трендов, так и ожидаемого в будущем климата суб-Арктических регионов. Было проведено сравнение прогнозов увеличения температуры воздуха по 19 моделям общей циркуляции. К концу 21 века, согласно расчетам, глобальная температура должна увеличиться на 1.1 - 3.1 °C, в среднем по всем моделям на 1.75 °C. При этом изменение температуры в зоне к северу от 60° широты в среднем по всем моделям вдвое превышает глобальную оценку и составляет 3.4 °C, а разброс укладывается в диапазон 1.5 - 7.6 °C, причем 17 из 19 моделей дают оценки, попадающие в значительно меньший диапазон от 2.2 °C до 3.9 °C. Присущие современным теоретическим моделям климата неопределенности указывают на необходимость разработки альтернативных методов прогноза, основанных на анализе эмпирических данных.

Данные указывают на то, что в ряде регионов прослеживается устойчивая связь аномалий температуры воздуха с изменением средней годовой глобально осредненной температуры, прогноз которой в этом случае можно использовать в качестве предиктора для расчета ожидаемых региональных изменений климата. На этом принципе нами была построена эмпирическая модель климата, основанная на расчете корреляций временных рядов глобальной $T_{\text{гл}}(t)$ и региональной $T_{\text{р}}(t)$ температуры воздуха, осредненной за различные периоды:

$$T_{\text{р}}(t) = a_{\text{р}} T_{\text{гл}}(t) + b_{\text{р}} + n(t), \quad (1.1)$$

В уравнении (1) $a_{\text{р}}$ и $b_{\text{р}}$ – коэффициенты линейной связи глобальной и региональной температуры воздуха; $n(t)$ – слагаемое, учитывающее влияние стохастических факторов и процессов синоптического масштаба. При построении модели предполагается, что влияние синоптических процессов можно свести к минимуму путем скользящего временного осреднения рядов $T_{\text{гл}}(t)$ и $T_{\text{р}}(t)$ за период $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ порядка десятилетия, при этом:

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} n(t) dt \rightarrow 0 \quad (1.2)$$

Полагая, что коэффициент $b_{\text{р}}$ не зависит от времени, с учетом (1.2) можно переписать уравнение (1.1) в следующем виде:

$$\Delta T_p(t_i) = a_p \Delta T_{гл}(t_i). \quad (1.3)$$

В (1.3) ΔT_p и $\Delta T_{гл}$ - изменения региональной и глобальной температуры воздуха. Для оценки a_p используются длительные ряды региональной и глобальной температуры воздуха. Прогноз изменения региональной температуры ΔT_p в зависимости от приращения $\Delta T_{гл}$ строится по уравнению (1.3).

В таблице 1 приведены сравнительные оценки изменения средней годовой температуры воздуха по крупным регионам мира, полученные при помощи расчетов по трем моделям общей циркуляции атмосферы, по данным палеоклиматических аналогов для трех теплых периодов прошлого, (климатический оптимум голоцена (HI), 6-10 тыс. лет назад, микулинское межледниковье (Ee), 125 тыс. лет назад, и быстрый климатический переход в период раннего дриаса (Dr), около 10300 лет назад), по современным трендам и по эмпирической модели климата. Диапазон изменения оценок по каждому региону отражает меру неопределенности современных прогнозов климата. Вывод, который можно сделать по результатам такого сравнения, состоит в том, что потепление будет наиболее сильным в суб-Арктической области, и следует ожидать, что оно окажет заметное воздействие на вечную мерзлоту и геосистемы Крайнего Севера, которые можно рассматривать в качестве косвенных индикаторов изменений климата.

Таблица 1. Сравнительная оценка прогнозов изменения климата (в пересчете на 1 °С глобального потепления).

Регион	Модели климата			Палео данные			тренд	Эмп. модель	
	GFDL	HadCM	ECNA M	HI	Ee	Dr		ΔT	r_T
Скандинавия	1÷2	1÷2	-0.5÷0.5	2÷3	1÷2	2÷3	0÷2	-1.5÷1.5	<0.6
Север ЕТС	2÷3	0÷1	1÷2	2÷4	2÷3	2÷4	1÷4	2.0÷3.5	0.6-0.8
С.з. России	1÷2	0÷1	0.5÷1.5	1÷2	0÷1	2÷4	1÷4	0÷1.5	<0.6
Вост. Европа	1÷2	-0.5÷0.5	0.5÷1.5	0÷1	0÷1	0÷4	0÷2	0÷0.5	<0.6
Зап. Европа	0÷1	0.5÷1.0	0.5÷1.0	0÷1	0÷1	0÷4	0÷2	0÷0.5	<0.6
Арктич. побережье	2.0÷3.0	1.0÷3.0	0.5÷1.5	3÷5	3÷5	0÷1	2÷4	3.0÷5.0	>0.8
Западная Сибирь	3.0÷4.0	3.0÷4.0	1.0÷2.0	1÷3	1÷3	4÷6	4÷5	4.0÷6.0	>0.8
Якутия	2.0÷3.0	2.0÷3.0	1.0÷2.0	1÷2	1÷2	3÷5	2÷3	2.5÷3.5	>0.8
Дальний Восток	1.5÷2.5	1.5÷2.5	-0.5÷0.5	1÷3	1÷3	0÷2	1÷2	2.0÷4.0	>0.8
Средняя Азия	1.5÷2.5	0.5÷1.5	-0.5÷0.5	- 1÷0	-	0÷4	1÷2	0.5÷1.0	<0.6
Индокитай	1.0÷2.0	0.5÷1.5	0.5÷1.0	- 1÷0	-	-	0÷1	0.5÷1.0	0.6-0.8
Юго-вост. Азия	0.5÷1.0	0.5÷1.5	0.5÷1.0	0÷1	-	-	-	0.5÷1.0	>0.8
Север Аля- ски	3.0÷4.0	2.0÷3.0	-1.0÷0.	4÷5	-	-	3÷5	4.0÷5.0	>0.8
Арктич. Канада	2.5÷3.5	1.5÷2.5	2.0÷3.0	2÷3	-	-	1÷2	1.5÷3.5	<0.6
Север Ат- лантики	2.0÷3.0	- 1.0÷0.5	-1.0÷0.5	-	-	-	-1÷0	- 1.0÷1.5	<0.6
Юж. Аляска	3.0÷4.0	2.0÷3.0	-0.5÷0.5	4÷5	-	-	3÷5	5.0÷6.0	>0.8
С/з США	2.0÷2.5	0.5÷1.5	-1.0÷0.5	-	-	0÷1	0÷2	0÷1.0	<0.6
С/в США	1.0÷2.0	0÷1.0	0÷1.5	0÷1	-	0÷ 1	0÷1	-0.5÷1.5	<0.6

За последние три десятилетия произошло сокращение площади морских льдов во все сезоны приблизительно на 30%, площадь снежного

покрова за это же время уменьшилась на 10%. Увеличилась температура вечной мерзлоты на 1-3 °С на Аляске и на 1 - 1.5 °С в Сибири. С конца 1970х годов годовой сток сибирских рек увеличился приблизительно на 10%, в зимний период увеличение стока достигало 40% при том, что осадки изменились незначительно. Произошло сокращение периода ледостава на реках и озерах. Данные по северному полушарию за 1846 — 1995 годы свидетельствуют о том, что период ледостава на пресноводных водоемах уменьшился в среднем на 12 дней за столетие как за счет более поздней осенней даты его начала (5,8 дн./100 лет), так и за счет более раннего весеннего вскрытия (6,5 дн./100 лет). Отмечены изменения границы тундры, которая смещается к северу в среднем на 100 км при увеличении среднегодовой температуры воздуха на 1 °С, и на ее место продвигаются леса. Согласно немногочисленным данным, почвы тундровой зоны, на протяжении многих столетий накапливавшие углерод, преобразуются из нетто-стока в нетто-источник углерода. В совокупности рассмотренные косвенные индикаторы подтверждают представление о том, что современные изменения климата наиболее сильно проявляются в высоких широтах.

2. Математическое моделирование вечной мерзлоты в условиях изменения климата.

Для геоэкологического прогноза были разработаны стационарная и динамическая модели вечной мерзлоты, учитывающие воздействие температуры воздуха, осадков, снежного покрова и растительности на температуру мерзлого грунта и глубину сезонного протаивания. В основу стационарной модели положена схема расчета глубины протаивания/промерзания, разработанная в 1970х годах В.А. Кудрявцевым. В простейшем варианте для расчета требуются температура воздуха и осадки (месячные данные), теплофизические свойства растительности и грунта. Основу динамической модели составляют

три блока, обеспечивающие совместное решение уравнения теплового баланса подстилающей поверхности, уравнения водного баланса и уравнения переноса тепла в слое снега и в грунте. Входными параметрами являются приходящая радиация, температура воздуха, влажность воздуха, осадки и облачность. В упрощенном варианте модели предполагается равенство температуры поверхности и воздуха, при этом расчет может проводиться при наличии данных только лишь о месячной температуре воздуха и осадках. Для расчета теплофизических свойств грунта, снежного покрова и растительности использовались полуэмпирические формулы, полученные различными авторами. Коэффициент теплопроводности грунта рассчитывался в зависимости от его влажности по формуле, предложенной А.В. Павловым:

$$\lambda_i = k_i \cdot (0,001 \cdot \rho_{\text{ск}} + 10 \cdot w_i / \rho_{\text{ск}} - 1,1) - 11,6 \cdot w_i / \rho_{\text{ск}}, \quad (2.1)$$

где $\rho_{\text{ск}}$ - плотность сухого грунта, кг/м^3 ; w_i - влажность (льדיстость), выраженная в миллиметрах воды на метр грунта, (мм/м); k_i - эмпирический коэффициент, значения которого приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения эмпирического коэффициента k.

	Песок	Супесь, суглинок	Глина
Мерзлая почва	1,95	1,75	1,60
Талая почва	1,75	1,60	1,50

Для расчета коэффициента теплопроводности органического слоя (торфа) использовались эмпирические формулы, полученные в Государственном гидрологическом институте на основе обобщения данных по болотным почвам Западной Сибири:

$$\lambda_m = 0,08 \exp(0,00388 \cdot w_m), \quad (2.2)$$

$$\lambda_r = (0,615 \cdot w_r + 22,2) \cdot 10^{-3}.$$

Объемный коэффициент теплоемкости всех типов почвы, C (дж/м²•°C) рассчитывался через удельную теплоемкость скелета, $C_{ск}$, (дж/кг•°C), плотность скелета, $\rho_{ск}$, (кг/м³) и влажность w , (мм/м):

$$C_{v,m} = C_{ск} \cdot \rho_{ск} + 4180 \cdot w_n + 2090 \cdot (w_m - w_n), \quad (2.3)$$

$$C_{v,t} = C_{ск} \cdot \rho_{ск} + 4180 \cdot w_t.$$

В этих формулах w_m и w_t - льдистость и влажность почвы, w_n - незамерзшая влага, (мм/м), 4180 и 2090 - удельная теплоемкость воды и льда, (дж/кг•°C). Характерные значения параметров грунта приведены в таблице 3. Коэффициент теплопроводности и теплоемкость снежного покрова принимались равными: $\lambda_{сн} = 0,23$ Вт/(м•°C), $c_{сн} = 2090$ дж/(кг•°C). Характерные значения характеристик низшей растительности (мохово - лишайникового покрова) приведены в таблице 4.

Таблица 3. Характерные значения теплофизических параметров грунтов.

	Песок	Супесь	Суглинок	Глина	Торф
$\rho_{ск}$, кг/м ³	1300	1400	1500	1500	200
$C_{ск}$, Дж/(кг•°C)	690	730	775	920	2000
w (min/max), мм/м	150/500	150/500	100/400	100/150	450/900
λ_m , Вт/(м•°C)	1,25/2,65	1,25/2,35	1,15/2,05	1,10/2,00	0,80/2,60
λ_t , Вт/(м•°C)	1,05/2,15	1,05/1,90	0,90/1,70	0,85/1,60	0,30/0,55

Таблица 4. Характеристики растительных покровов в талом состоянии.

	$\rho_{ск}$, кг/м ³	w , мм/м	λ_t , Вт/(м•°C)
Лишайник	70-140	10-30	0,15-0,35
Мох бурый	40-240	5-800	0,15-0,35
Сфагнум	100-270	10-650	0,15-0,40

Для проверки моделей были использованы измерения глубины сезонного протаивания на экспериментальных площадках международного проекта CALM, расположенных в различных зонах вечной мерзлоты. Результаты измерений доступны через интернет на странице проекта CALM (<http://www.geographv.uc.edu/~kenhinke/CALM/>). Обе модели удовлетворительно описывают максимальную глубину протаивания мерзлого грунта. Говоря об удовлетворительном соответствии расчетных и измеренных величин, мы отмечаем тот факт, что в случае если влияющие параметры модели принимают значения в пределах диапазона их изменений на данном контрольном участке, в результате расчета получаются значения глубины протаивания, укладываемые в диапазон ее измерений на данной площадке. С учетом значительной пространственной изменчивости параметров вечной мерзлоты результаты расчетов по геокриологическим моделям необходимо оценивать именно в означенном выше статистическом смысле.

3. Прогноз изменения вечной мерзлоты и оценка геокриологических опасностей для природных ландшафтов и инфраструктуры районов Крайнего Севера в условиях антропогенного потепления.

При построении долгосрочных геокриологических прогнозов необходимо учитывать неклиматические факторы, оказывающие влияние на вечную мерзлоту, которые сами могут значительно изменяться под воздействием потепления. Важнейшим среди них является растительность, в особенности низший органический слой, образуемый мохово-лишайниковой растительностью и торфом. Высокие теплоизолирующие свойства этого слоя особенно сильно проявляются в летнее время, сохраняя мерзлый грунт.

Данные наблюдений позволяют построить сценарий изменения растительности при увеличении температуры воздуха, предполагающий первоначальное увеличение биомассы (высоты и сомкнутости) мохово-лишайникового покрова. Затем, по достижении некоторой критической величины потепления, начинают преобладать процессы изменения видового состава, проявляющиеся в постепенном вытеснении и замещении мохообразных кустарниками. Для оценки влияния таких изменений растительности на вечную мерзлоту были проведены серии расчетов, в которых параметры растительности изменялись во времени в соответствии с указанным выше сценарием. Было выделено четыре градации толщины мохово-лишайникового слоя высотой 5, 10, 15 и 20 см. Предполагалось, что первоначальная толщина мохового слоя, задаваемая равной 5 см для арктической пустыни и 10 см для арктической тундры, увеличивается на 5 см с каждым градусом увеличения средней годовой температуры воздуха потепления в данной точке. По достижении 20 см с каждым последующим градусом потепления толщина мохового слоя уменьшается, также на 5 см, пока не будет достигнут предельный случай, при котором он замещается сосудистыми растениями (кустарниками), оказывающими небольшое теплоизолирующее воздействие.

Предполагалось, что изменения растительности сопровождались изменениями снежного покрова, которые рассчитывались по следующей схеме. В случае, когда высота растительности не превышала 10 см, высота снежного покрова принималась равной базовому значению, определяемому количеством зимних осадков. При увеличении высоты растительности до 20 см (толстый слой мха), и до 30-50 см (кустарник) высота снега увеличивалась на 10% и на 20%, что соответствовало большей снегоудерживающей способности такого покрова.

Согласно расчету, первоначальное увеличение толщины мохового слоя, обладающего низкой теплопроводностью в теплый период года, с 10 см до 20 см, может снизить среднегодовую температуру вечной мерзлоты на 0.5 - 1.0 °С и уменьшить глубину протаивания в среднем по криолитозоне на 25 см, или приблизительно на 30%. Это сравнимо с прямым воздействием повышения температуры воздуха, ожидаемого в ближайшие два десятилетия, и может заметно уменьшить его эффект. При уменьшении толщины мха с 10 см до 5 см расчетная глубина сезонного протаивания возрастает в среднем по всей криолитозоне на 13 см (около 15%). Если же мохово-лишайниковый слой полностью замещается кустарником, расчетная глубина протаивания возрастает в среднем на 28 см (27%).

Для проведения расчетов в масштабе северного полушария были созданы базы данных температуры воздуха, осадков, типа грунта и растительности в узлах регулярной сетки с пространственным шагом 0.5 градуса по широте и долготе. При помощи стационарной модели были рассчитаны положения границ вечной мерзлоты и глубина сезонного протаивания для пяти сценариев изменения климата, построенных на основе расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы GFDL, NCAR, CCC, HadCM, и ECHAM-4 с учетом изменения растительности. Эти сценарии были выбраны путем сравнения результатов расчетов современной динамики климата по 19 различным моделям с данными наблюдений о его изменениях в Арктике.

На рисунке 1 показаны последовательные изменения положения южной границы криолитозоны и границы зоны сплошной приповерхностной вечной мерзлоты, рассчитанные для условий 2030, 2050 и

2080 г. по "среднему" сценарию GFDL (в диссертации приведены аналогичные карты для всех пяти выбранных сценариев). Поскольку мерзлые толщи южной периферийной области обладают небольшой мощностью, за время порядка нескольких десятилетий возможно полное протаивание большинства островов мерзлоты и смещение южной границы криолитозоны к северу на десятки километров. Обозначенное на рис.1 смещение границы "холодной" сплошной мерзлоты следует понимать в том смысле, что местами будут возникать и развиваться острова протаивания с отрывом кровли мерзлоты от поверхности и сохранением ее в более глубоких слоях. Между областями деградации островной и сплошной вечной мерзлоты на рисунке 1 находятся большие участки криолитозоны, статус которых в процессе потепления не изменится. Они будут характеризоваться прерывистым распространением мерзлых пород, сомкнутость которых будет уменьшаться в процессе потепления, а глубина сезонного протаивания расти.

Прогностические оценки площади криолитозоны приведены в таблице 5. Диапазон изменения общей площади мерзлоты (а также отдельно сплошной криолитозоны) в северном полушарии к 2030, 2050 и 2080 годам составляет, соответственно, 10%-18% (15%-25%); 15%-30% (20%-40%), и 20%-35% (25%-50%). Расположение модельных сценариев в таблице 5 соответствует эффекту, который они оказывают на вечную мерзлоту. Наиболее радикальные изменения дает сценарий ECHAM, в то время как сценарий NCAR оказывается наиболее консервативным в плане воздействия прогнозируемого изменения климата на распространение вечной мерзлоты. Сценарий GFDL можно назвать в этом отношении "средним", а результаты, получаемые с использованием прогнозов CCC и HadCM, можно условно принять за верхнюю и нижнюю границы вероятного интервала изменений вечной мерзлоты при климатическом потеплении.

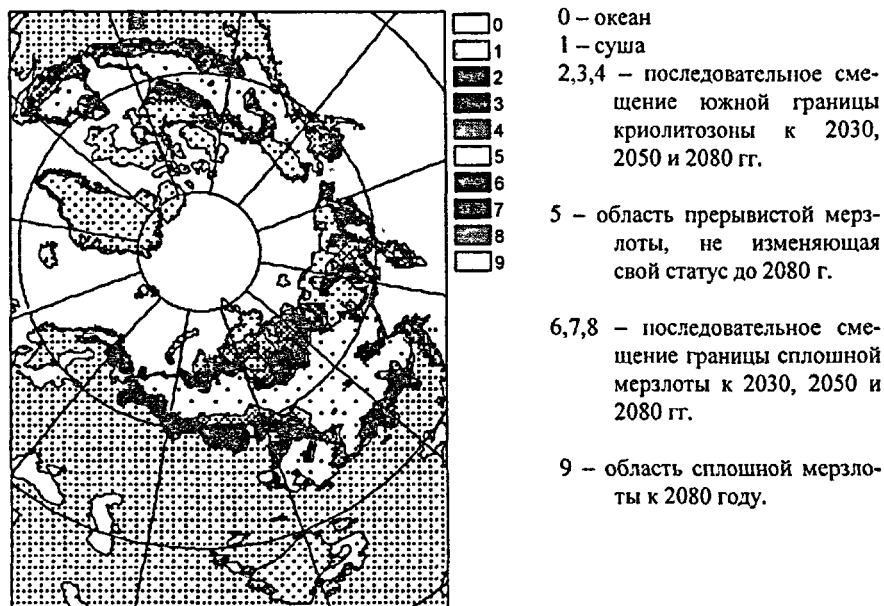


Рис. 1. Прогноз изменения положения южной границы криолитозоны и границы сплошной мерзлоты по сценарию GFDL для 2030, 2050 и 2080 г.

Таблица 5. Расчетные площади криолитозоны северного полушария (млн. км² и % от современной) для 2030, 2050 и 2080 г.

Сценарий	Общая площадь криолитозоны			Площадь сплошной мерзлоты		
	2030	2050	2080	2030	2050	2080
ECHAM	22.30	19.31	17.64	9.37	7.25	5.88
	82%	71%	65%	75%	58%	47%
CCC	23.72	21.94	20.66	9.83	8.19	6.93
	87%	81%	76%	79%	66%	56%
GFDL	24.11	22.38	20.85	10.19	8.85	7.28
	89%	82%	77%	82%	71%	59%
HadCM3	24.45	23.07	21.36	10.47	9.44	7.71
	90%	85%	78%	84%	76%	62%
NCAR	24.24	23.64	21.99	10.69	10.06	9.14
	89%	87%	81%	86%	81%	74%

Таяние приповерхностной вечной мерзлоты будет сопровождаться, изменениями ландшафта с преобладанием депрессивных форм, образуемых термокарстом. Такие изменения опасны для имеющихся сооружений. В Западной Сибири ежегодно происходит около 35 тысяч отказов и аварий на магистральных нефте- и газопроводах, общая протяженность которых в России составляет приблизительно 350 тысяч километров. Около 21% всех аварий вызваны механическими воздействиями, в том числе связанными с потерей устойчивости фундаментов и деформацией опор. Имеются многочисленные примеры нарушения целостности и разрушения жилых и производственных зданий из-за уменьшения несущей способности вечной мерзлоты, и различных форм термокарста. По данным проводившихся, исследований доля зданий, находящихся в опасном неустойчивом состоянии составляет в Норильске 10%, в Тикси 22%, в Дудинке 55%, в Диксоне 35%, в Певеке и в Амдерме 50%, в Чите 69% и в Воркуте 80%. В Якутске за период с начала 1970х годов более 300 зданий получили серьезные повреждения в результате просадок мерзлого грунта. По мнению эксперта Института Мерзловедения Сибирского отделения РАН, в последнее десятилетие изменение климата могло стать основной причиной ослабления фундаментов строений на вечной мерзлоте. Статистика показывает, что в период с 1990 по 1999 г. число зданий, получивших различного рода повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось по сравнению с предшествующим десятилетием на 42% в Норильске, на 61% в Якутске и на 90% в Амдерме. Это свидетельствует о необходимости разработки методов прогноза геокриологических опасностей для инженерной инфраструктуры, построенной на вечной мерзлоте..

Для выявления областей, наиболее подверженных геокриологическим опасностям при изменении климата, и районирования территории России нами был разработан достаточно простой прогностический метод, основанный на применении расчетного индекса:

$$I_r = \Delta Z_n C_{л.} \quad (3.1)$$

Здесь I_r - индекс геокриологической опасности, ΔZ_n - изменение глубины сезонного протаивания вечной мерзлоты, рассчитанное для заданного прогноза климата, и $C_{л.}$ - процентное содержание льда в мерзлом грунте. Согласно (3.1), вероятность развития деструктивных геокриологических процессов приобретает наибольшую величину в случае, когда мерзлый грунт содержит большое количество льда, и предстоящее изменение климата вызовет значительное увеличение глубины сезонного протаивания. В таких районах возможны осадки оттаивающего грунта за счет интенсивного термокарста. Изменение температуры грунта, которое является главным фактором, влияющим на его несущую способность, неявно учитывается при расчете изменения глубины протаивания.

При расчете индекса природной геокриологической опасности были использованы данные о процентном содержании льда в мерзлом грунте в узлах регулярной сетки с шагом 0.5×0.5 градуса. Эти данные представляют собой электронный вариант геокриологической карты Международной ассоциации мерзлотоведения. Необходимые для расчета индекса геокриологической опасности прогнозы изменения глубины сезонного протаивания вечной мерзлоты были получены при

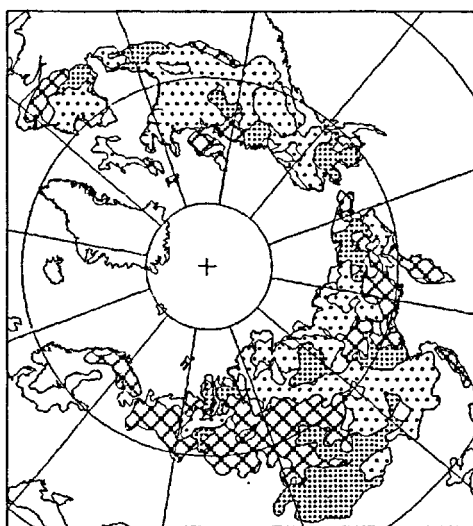
помощи стационарной модели. Результаты расчетов и прогностические карты для пяти сценариев изменения климата и трех временных интервалов, 2030, 2050 и 2080 гг. рассматриваются в параграфе 3.2 диссертации. По данным расчетов к середине столетия на большей части криолитозоны глубина протаивания может возрасти на 15%-25%, местами на 50% и более.

На рисунке 2а показана карта индекса природной геокриологической опасности для климатических условий середины 21 века, рассчитанная с использованием "среднего" сценария GFDL. Весь диапазон изменения индекса был разбит на три категории, которые обозначают области с малой, средней и большой вероятностью развития деструктивных геоморфологических процессов, связанных с деградацией вечной мерзлоты. Карта на рисунке 2а заметно отличается от широтно-зональной поскольку алгоритм расчета индекса природной геокриологической опасности учитывает топографию, растительность, и региональные особенности современного и прогнозируемого климата (эти факторы учитываются при расчете глубины протаивания), а также неоднородное содержание льда в мерзлом грунте.

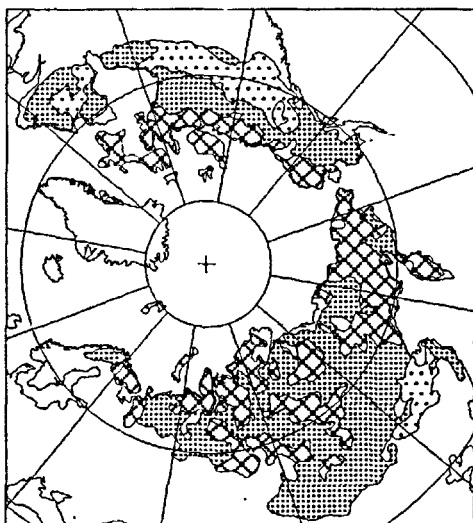
Необходимо отметить, что природные ландшафты и инфраструктура районов Крайнего Севера обладают различной устойчивостью по отношению к изменениям климата. Существующая инфраструктура северных регионов достаточно хорошо адаптирована к современным мерзлотно-климатическим условиям. При оценке ее устойчивости целесообразно исходить не из абсолютных, а из относительных изменений несущей способности мерзлого грунта, используя несколько иной индекс, который можно назвать индексом геокриологического

риска для инфраструктуры. От индекса природной геокриологической опасности он отличается лишь тем, что в формуле (3.1) изменение глубины протаивания выражено в процентах от современной нормы. Расчетные значения такого индекса для криолитозоны Евразии по климатическому сценарию GFDL на 2050 г. показаны на рисунке 26 (в диссертации имеется аналогичная карта для криолитозоны северного полушария).

В области наибольших значений индекса геокриологического риска попадают Чукотка, бассейны верхнего течения Индигирки и Колымы, юго-восточная часть Якутии, значительная часть Западно-Сибирской равнины, побережье Карского моря, Новая Земля, а также часть островной мерзлоты на севере европейской территории. В этих районах имеется развитая инфраструктура, в частности газо- и нефтедобывающие комплексы, система трубопроводов Надым-Пур-Таз на северо-западе Сибири, Билибинская атомная станция и связанные с ней линии электропередач от Черского на Колыме до Певека на побережье Восточно-Сибирского моря. Деградация мерзлоты на побережье Карского моря может привести к значительному усилению береговой эрозии, за счет которой в настоящее время берег отступает ежегодно на 2-4 метра. Особую опасность представляет ослабление вечной мерзлоты на Новой Земле в зонах расположения хранилищ радиоактивных отходов. В то же время расчеты свидетельствуют о том, что на больших территориях Якутии и Западной Сибири запас надежности инженерных сооружений и построек на вечной мерзлоте, рассчитанных на эксплуатацию в современных климатических условиях, уменьшится незначительно.



А



Б



Рис. 2. Индекс геокриологической опасности (а) и индекс геокриологического риска для инфраструктуры (б) для климатических условий 2050 года по сценарию GFDL.

Закключение н выводы

1. Имеются устойчивые корреляционные связи между наблюдаемыми изменениями среднегодовой глобальной температуры и температурой на большей части Сибири и на Аляске. Изменения температуры в этих регионах в 3-5 раз превышают глобальные изменения.
2. Сценарии климатических моделей GFDL, NCAR, CCC, ECHAM и HadCM хорошо воспроизводят региональную картину потепления высоких широт, получаемую по эмпирической модели климата.
3. Пространственные распределения изменений температуры воздуха, мерзлого грунта и глубины сезонного протаивания вечной мерзлоты не являются подобными в силу действия локальных факторов и обратных связей через изменения растительности и снегонакопления.
4. Диапазон сокращения общей площади приповерхностной вечной мерзлоты (а также отдельно сплошной криолитозоны) в северном полушарии, рассчитанный с учетом обратных связей, к 2030, 2050 и 2080 годам составляет, соответственно, 10%-18% (15%-25%); 15%-30% (20%-40%), и 20%-35% (25%-50%) от современной величины.
5. Увеличение глубины протаивания к 2030 г. может достигать 10%-15%; к 2050 г. 15%-25%, местами до 50%; к 2080 г. 30%-50% и более.
6. Увеличение толщины мохового слоя от 10 до 20 см может уменьшить среднюю по криолитозоне глубину протаивания до 30%. При вытеснении мхов кустарником с учетом сопутствующих изменений снегонакопления глубина протаивания может увеличиться до 27%.
- 7 Согласно расчетам, ожидаемые изменения вечной мерзлоты представляют наибольшую опасность для инфраструктуры на Чукотке, в бассейнах верхнего течения Индигирки и Колымы, в юго-восточной части Якутии, на ряде участков Западно-Сибирской равнины, на побережье Карского моря, на Новой Земле, а также в области островной мерзлоты на севере европейской территории. В то же время во многих районах Якутии и Западной Сибири изменение климата в первой половине текущего столетия не приведет к заметной потере устойчивости сооружений, построенных на вечной мерзлоте.

Публикации автора по теме диссертации.

1. Анисимов, О.А. и М.А. Белолуцкая, 2001. Применение геоинформационной системы для прогноза агроклиматических характеристик.- *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 89-98.
2. Анисимов, О.А. и М.А. Белолуцкая, 2002. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России.- *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 15-22.
3. Анисимов, О.А. и М.А. Белолуцкая, 2003. Современное потепление как аналог климата будущего.- *Физика атмосферы и океана*, № 2, с. 211-221.
4. Анисимов, О.А., М.А. Белолуцкая, и В.А. Лобанов, 2003. Современные изменения климата и природной среды в области высоких широт Северного полушария.- *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 18-30.
5. Анисимов, О.А. и М.А. Белолуцкая, 2004. Моделирование воздействия антропогенного потепления на вечную мерзлоту: учет влияния растительности.- *Метеорология и гидрология*, (в печати).
6. Анисимов, О.А. и М.А. Белолуцкая, 2004. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогноз и оценка неопределенности. В кн.: *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, Москва, (в печати).
7. Шутов, В.А. и М.А. Белолуцкая, 1990. Оценка инфильтрации талых вод по данным наблюдений на экспериментальных площадках.- *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 93-100.
8. Anisimov, O.A., Poljakov, V.Yu, and M.A. Belolutskaia, 2000. Computerised Geocryological Information System for the Studies of Climate-Permafrost Interaction in the Northern Hemisphere.- *Proceedings of the American Geophysical Union, Fall Meeting, San-Francisco, December 2000*.
9. Anisimov, O.A., and M.A. Belolutskaia, 2001. Climate Change, Degradation of Permafrost, and Hazards to Infrastructure in the Circumpolar Arctic.- *Proceedings of the American Geophysical Union, Fall Meeting, San-Francisco, December 2001*.

112 - 3576