

РГБ ОД

25 АПР 2000

На правах рукописи

УДК 551.345.2:551.583(470.1/.25+571.1)

Чепурнов Михаил Борисович

**Прогноз изменения геокриологических условий Европейского  
Севера России и Западной Сибири в связи с возможными  
изменениями климата**

Специальность 04.00.07 - инженерная геология,  
мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата геолого-минералогических наук

МОСКВА, 2000

Работа выполнена на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

**Научные руководители:**

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор Э.Д. Ершов  
кандидат геолого-минералогических наук,  
доцент С.Ю. Пармузин

**Официальные оппоненты:**

доктор географических наук,  
профессор В.И. Соломатин  
кандидат геолого-минералогических наук  
В.А. Дубровин

**Ведущая организация:**

ГПИИ "Фундаментпроект"

Защита диссертации состоится 7 апреля 2000 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета по защите кандидатских диссертаций по инженерной геологии, мерзлотоведению и грунтоведению К.053.05.06 в Московском Государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119899, ГСП, Москва, Воробьевы горы, МГУ, геологический факультет, аудитория № 415.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке геологического факультета МГУ - зона "А" главного здания, 6 этаж.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 119899, ГСП, Москва, Воробьевы горы, МГУ, Геологический факультет, учёному секретарю диссертационного совета, д. г.-м. н. В.Н. Соколову.

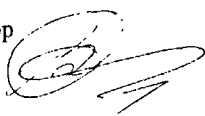
Автореферат разослан 6 марта 2000 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

доктор геолого-минералогических наук, профессор

В.Н. Соколов

09 (2031) 487,0  
9 (2053) 487,0



## **ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность темы. В последние десятилетия большой интерес вызывает проблема глобальных климатических изменений, связанных как с естественно-историческими вариациями экосистем Земли, так и с хозяйственной деятельностью человека. Особенно остро проблема глобального потепления климата, устойчивая тенденция которого наблюдается примерно с середины XX века, может затронуть те регионы России, где сейчас существуют многолетнемёрзлые породы (ММП). В случае осуществления многочисленных прогнозов, имеющихся на сегодняшний день и предполагающих сохранение тенденции повышения среднеглобальной температуры воздуха в XXI веке за счёт увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере, в северных регионах России можно ожидать неизбежной реакции огромных массивов многолетнемёрзлых пород, выражающейся в повышении температуры пород, оттаивании ММП, осадке поверхности оттаивающих льдистых отложений, новообразованиях и активизации криогенных геологических процессов. Это, в свою очередь, может привести к уменьшению несущей способности оттаявших отложений, в результате чего можно ожидать нарушений функционирования инженерных, сооружений эксплуатируемых на сегодняшний день в криолитозоне. Таким образом, неучёт фактора глобального потепления при строительстве новых и эксплуатации уже построенных сооружений в области распространения многолетнемёрзлых пород может привести к весьма существенным убыткам для экономики и хозяйства России, связанным с ликвидацией последствий оттаивания массивов ММП.

Цель и задачи работы. Цель настоящей работы - оценить изменения геокриологических условий Европейского Севера России и Западной Сибири как в связи с естественной динамикой климата, так и в связи с глобальным потеплением климата в XXI веке.

В связи с поставленной целью решались следующие задачи:

- 1) Обобщить и проанализировать имеющиеся на сегодняшний день представления о динамике климата в прошлом и будущем.
- 2) Выявить закономерности изменения среднегодовой, максимальной и минимальной среднемесячной температуры воздуха по данным инструментальных

метеонаблюдений и осуществить прогноз её изменений в XXI веке при естественно-исторических изменениях и с учётом различных сценариев потепления климата.

3) Изучить пространственные и временные закономерности изменения геокриологических условий исследуемых регионов при естественно-исторической динамике климата и с учётом глобального потепления.

4) Установить закономерности развития осадки поверхности оттаивающих льдистых отложений и возможность развития процессов термокарста.

5) Составить карты прогноза изменения геокриологических условий исследуемых регионов на 2100-й год при различных вариантах возможных климатических изменений.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- На основе гармонического анализа данных метеонаблюдений получены аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать динамику температуры воздуха и ММП в будущем при естественно-исторических изменениях климата;

- Получены пространственно-временные закономерности эволюции мёрзлых и талых пород различного состава в результате естественно-исторической динамики климата и выявлены промежутки времени, когда наиболее вероятным становится возникновение перелетков мёрзлых пород в талых породах, или образования несливающейся мерзлоты в области распространения высокотемпературных ММП.

- Установлены количественные закономерности изменения геокриологических условий: времени начала оттаивания ММП, изменения температуры многолетнемёрзлых пород, глубины оттаивания в грунтах различного состава при различных сценариях глобального потепления климата;

- Осуществлён прогноз возможной осадки поверхности оттаявших льдистых отложений и развития термокарста при возможном глобальном потеплении климата за счёт увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере;

- Составлены карты прогноза изменения геокриологических условий Европейского Севера России и Западной Сибири масштаба 1:2 500 000 на 2100-й год при естественной динамике климата и при различных трендах повышения температуры воздуха за счёт увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты настоящих исследований могут быть использованы для обоснования выбора принципов и методов строительства различных сооружений в области криолитозоны; разработки мероприятий по защите уже эксплуатируемых сооружений от негативных последствий, связанных с повышением температуры и оттаиванием мерзлых пород; принятия оптимальных технико-конструктивных решений строительства и эксплуатации сооружений; разработки рекомендаций по управлению мерзлотными процессами в целях охраны природной среды и инженерной защите территорий.

Полученные в результате выполненных исследований материалы были использованы при написании двух научно-технических отчетов.

Личный вклад автора. В ходе исследований с личным участием автора проведено изучение и обобщение современных представлений о закономерностях динамики климата, прогнозов его изменений и возможной реакции ММП; проведены многочисленные прогнозные расчеты для различных районов криолитозоны; на основе расчетов установлены частные количественные закономерности изменения геоэкологических характеристик ММП и составлены прогнозные карты масштаба 1 : 2 500 000.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международной конференции “Мониторинг криосферы” РАН (Пушино, 1999), на “Ломоносовских чтениях” (Москва, 1996 и 1999), на “Первой конференции геоэкологов России” (Москва, 1996). По теме исследований опубликовано 5 работ. В 2000 году автор стал лауреатом конкурса молодых ученых МГУ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, изложенных на 138 страницах машинописного текста. Работа включает 15 таблиц, иллюстрирована 85 рисунками. Список использованной литературы составляет 79 наименований.

Автор глубоко признателен за понимание и поддержку во время написания работы своей маме Татьяне Петровне Чепурновой. Автор выражает свою глубочайшую признательность своим научным руководителям - профессору Э.Д. Ершову и доценту С.Ю. Пармузину, без помощи и научного руководства которых, эта работа была бы невозможна. Особо хотелось бы поблагодарить А.В. Медведева за помощь при освоении расчетных программ. Искреннюю

признательность за помощь и научные консультации автор выражает А.И. Тюрину, В.Н. Зайцеву, Т.Ю. Шаталовой, Ю.К. Васильчуку, А.Н. Козлову, а также всем сотрудникам кафедры геоэриологии МГУ и друзьям, помогавшим при написании и оформлении работы.

## Содержание работы

### Глава I. Существующие представления о динамике климата и реакции ММП на возможные климатические изменения

Природные процессы в большинстве случаев характеризуются циклическим ходом развития. Продолжительность циклов связана с общепланетарными геофизическими причинами и колеблется в широких пределах — от суток до миллионов лет и более. Зафиксированы 11-летний цикл, 2-3 и 5-6-летние циклы, 22-летний цикл и полувековая (35-40-летняя) цикличность; значительные геофизические проявления дают вековые колебания солнечной активности. Продолжительность векового цикла в настоящее время установлена предварительно и находится в пределах 70 — 100 лет [Рубинштейн и др. 1966, Дружинин и др. 1966, Дроздов и др. 1971, Алисов, 1962, Скорбилин, 1992, Белопухова, 1976, Шеко, 1984, Полозова, 1974]. Возможность существования более длиннопериодных колебаний (200-300-летних, 600-700-летних, 1500-2000-летних) косвенно подтверждается многочисленными астрономическими наблюдениями [Шеко, 1984, Алисов, 1962].

В настоящее время существует большое количество прогнозов климатических изменений и реакции криолитозоны на глобальные вариации климата, в подавляющем большинстве связываемые не только с естественно-историческими ритмами, но и с увеличением содержания в атмосфере парниковых газов и повышением температуры воздуха в XXI веке на величину 1.5-6<sup>0</sup>С.

Инструментальные наблюдения доказывают четкую корреляцию увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере с потеплением климата как в прошлом, так и в настоящее время и предполагают её в будущем. Проблемой прогноза состояния ММП при климатических колебаниях занимались О.А. Анисимов, В.Т. Балобасов, Э.Д. Ершов, А.В. Павлов, В.П. Чернядьев, А.Л. Чеховский, С.Е. Гречищев,

Н.А. Шполянская, В.Т. Трофимов, Ю.К. Васильчук, С.Ю. Пармузин, С.М. Фотиев и другие. Анализируя сценарии возможной реакции криолитозоны можно отметить, что в геокриологических прогнозах до сих пор нет чётко выработанной методики определения прогнозных характеристик верхних граничных условий, под вопросом находится прогноз тренда и величины глобальных изменений климата; недостаточное внимание уделяется динамике температурного поля по глубине, его перестройки во времени, возможности и величине оттаивания подошвы многолетнемерзлых пород. Кроме того, в прогнозных моделях практически отсутствует прогноз зарождения или развития криогенных процессов, возникновения которых при оттаивании больших массивов мерзлых пород неизбежно, не рассматривается возможная осадка в процессе оттаивания мерзлых массивов и парагенетически связанные с ней процессы.

## Глава 2. Методика прогнозной оценки динамики криолитозоны в связи естественно-историческими изменениями климата и повышенном концентрации парниковых газов в атмосфере

При задании на ближайшие 100 лет верхних граничных условий (температуры воздуха, характера изменения снежного и растительного покровов) на случай естественно-исторического хода изменения природной обстановки обычно возникают наибольшие трудности. Используемый на кафедре геокриологии метод гармонического анализа метеоданных был апробирован применительно к конкретным условиям исследуемых территорий. На основе гармонического анализа представляется возможным произвести разложение хода температуры воздуха на ряд элементарных гармоник с определенными периодами, амплитудами и сдвигами фаз, обусловленными планетарными геофизическими процессами. Для того, чтобы исключить влияние экстремальных отклонений значений температуры от среднепогодных, данные ежегодных метеонаблюдений сглаживаются скользящими 10-ти летними температурами, а полученная сглаженная кривая температуры воздуха служит исходной для дальнейшего анализа.

На прогнозный период (до 2100-го года) были получены значения среднегодовой, максимальной и минимальной температуры воздуха, необходимыми для расчётов температурного режима пород. На основе расчётной температурной

кривой прогнозируются значения среднегодовой температуры воздуха в любой момент времени.

При выполнении геокриологических расчетов рассматривалось два варианта изменения температуры воздуха в будущем. Первый вариант предполагал, что в ближайшие 100 лет температура воздуха будет изменяться в соответствии с естественно-историческими ритмами. Во втором варианте прогнозных расчетов было принято, что на естественный ход температур накладывается возможное потепление.

При известной динамике температуры воздуха для расчета изменения температурного режима грунта, глубин сезонного и многолетнего оттаивания и промерзания использовалась программа "WARM" разработанная Н.В. Емельяновым и др. (1994) под руководством Л.Н. Хрусталева, которая позволяет определить температурное поле пород на заданные моменты времени в заданных точках пространства.

На первом этапе расчетов до составления долгосрочного геокриологического прогноза необходимо получить начальное распределение температуры пород по глубине расчетной области, соответствующее современному климату и геолого-географическим условиям участков. Поэтому для каждого пункта при задании среднепогодных значений климатических параметров и характерном геологическом разрезе решалась задача определения периодически установившегося режима температурного поля пород. Результаты решения этой задачи являлись начальными условиями для дальнейшего геокриологического прогноза.

Механизм учёта потенциальной осадки поверхности оттаивающего грунта при использовании программы WARM в двухмерной постановке включает в себя следующее: по мере оттаивания отложений в соответствии с ранее рассчитанной потенциальной осадкой грунта при оттаивании, с верхней границы расчётной области изымаются блоки такой мощности, на которую эта осадка произошла, и верхний блок заменяется граничным. В том случае, когда на месте образующегося понижения предполагается образование бессточного водоёма, внутригрунтовые блоки заменяются не на граничные, а на внутренние, с той лишь разницей, что в них задаются теплофизические характеристики воды (летом) и льда (зимой).

При прогнозе осадки оттаивающих грунтов в одномерной постановке, нами использовались два независимых метода, разработанных на кафедре геокриологии:



программа WARM и программа, разработанная И.А. Барановой и А.В. Медведевым , которая составлена на языке FORTRAN -77 (IV) и представляет собой описание разностного алгоритма со сглаживанием коэффициентов для численного решения одномерной многофронтной задачи типа Стефана для дисперсных пород. Постановка задачи допускает существование внешнего фронта, который определяет понижение поверхности горных пород в процессе осадки при оттаивании.

### Глава 3. Геокриологические условия исследуемых территорий

Эта глава написана на основе многочисленных ранее опубликованных работ Ю.Б. Баду, В.В. Баулина, Е.Б. Белогуховой, Ю.К. Васильчука, И.Д. Данилова, Н.С.Даниловой, Г.И. Дубикова, Н.Г. Обермана, С.Е. Суходольского, В.Т. Трофимова и других, посвящённых описанию природных условий Европейского Севера России и Западной Сибири.

Север Европейской части России и Западная Сибирь имеют ряд общих особенностей как в физико-географическом , так и в геолого-тектоническом строении и геологическом развитии в мезокайнозое. Оба региона прошли сходные этапы геологического развития платформ, что определило накопление мощного осадочного чехла песчано-глинистых отложений; ледниковые эпохи и трансгрессии плейстоцена в обоих регионах были синхронными и близкими по широте проявления, а морские и ледово-морские осадки плейстоцена являются рельефообразующими и слагают верхнюю часть разреза ММП; равнинность и незащищённость севера Печерской и Западно-Сибирской низменностей определяют интенсивный теплоперенос в широтном направлении; в обоих регионах колебания климата в плейстоцене и голоцене были близкими по продолжительности , амплитудам и значениям средних вековых температур воздуха; накопление и распределение снежного покрова подчиняется сходным закономерностям. Сходность природных условий определила общность условий формирования ММП обоих регионов. Однако различия в величинах теплоточков, большая мягкость современного климата Европейского Севера России определяют различия в распространении климатических и геокриологических зон.

На территории Европейского Севера России область распространения многолетнемерзлых пород вытягивается сплошной полосой вдоль арктического побережья. Ширина этой полосы меняется от 40-50 км на Кольском полуострове до 180-200 км в Приуралье. Почти повсеместно мерзлые породы имеют несплошное распространение, за исключением северо-востока территории [Почвешно-геологические..., 1984].

Наибольшего распространения многолетнемерзлые породы достигают в Большеземельской тундре. Зона практически сплошного распространения мерзлых пород охватывает Пай-Хой и полосу побережья арктического бассейна к востоку от Печорской губы шириной 100 — 150 км. Южнее, в Большеземельской тундре, распространение мерзлых пород имеет массивно-островной и островной характер.

Отличительной особенностью рассматриваемой территории является увеличение льдистости пород на север и восток, что обуславливает наиболее интенсивное развитие криогенных процессов именно на северо-востоке. Чрезвычайно многочисленны термокарстовые западины, представленные широкими (до 1 км и более), глубиной обычно не более 2-х метров, озерами, составляющими на северо-востоке материковой части до 50% поверхности участков с льдистыми ММП. Также отмечаются большое число дренированных западин. Реликтовые термокарстовые формы - степные блюдца отличаются меньшими по сравнению с современными размерами и прослеживаются в большинстве регионов в виде остаточно-полигонального западинного микро рельефа.

В пределах континентальной части Западно-Сибирской плиты многолетнемерзлые породы, залегающие непосредственно ниже слоя сезонного протаивания, занимают около 23 % ее территории. С учетом площади распространения глубокозалегающих ММП, развитых в южной части плиты, эта площадь возрастает до 50 %. На самом севере региона ММП развиты вне акваторий непосредственно с поверхности практически на всех элементах рельефа.

Южнее Северного полярного круга расположена обширная территория прерывистого по площади распространения многолетнемерзлых пород, протягивающаяся с севера на юг почти на 600 км. Северная часть ее, где многолетнемерзлые породы, развитые непосредственно под слоем сезонного протаивания, занимают более 50 % площади, существенно отличается от более

ожных районов, для которых характерно менее широкое их распространение. В северной части описываемой территории преобладают многолетнемерзлые породы, а тальные грунты развиты здесь не только под акваториями озер и руслами рек (как и севернее Полярного круга), но и часто отмечаются в поймах крупных и средних рек.

Среди процессов, наиболее широко развитых в районах криолитозоны Западной Сибири, также как и Европейского Севера, можно выделить процессы связанные с оттаиванием пород: термокарст, солифлюкция, термоэрозия, термоабразия. На севере Западно-Сибирской плиты одним из самых распространенных криогенных процессов является термокарст. Образуемые термокарстом формы рельефа распространены повсеместно. Это термокарстовые озера, диаметром от первых десятков метров до первых километров, глубиной от 1 до 15 м и т. д.

#### **Глава 4. Прогноз температурного режима пород в результате естественной динамики климата и глобального потепления**

За минимально возможную величину (нижнюю границу) климатических изменений в ближайшие 100 лет была принята прогнозная температура воздуха, полученная с помощью гармонического анализа многолетних инструментальных метеонаблюдений без наложения на неё тренда потепления.

Анализ прогнозных температурных кривых естественной динамики климата позволяет сделать выводы о том, что для Европейского Севера России прогнозируется отчетливый период потепления климата (2005 -2015 гг.), вызванный восходящими ветвями температурных ритмов 40, 88 и 250 лет, и сменяющий его период похолодания (до 2050 г.), вызванный нисходящими ритмами 40 и 88 лет. Эти колебания составляют примерно  $\pm 1.2$  °С. На фоне этих колебаний есть и более мелкие, являющиеся результатом совпадения максимумов или минимумов гармоник с периодами 11 и 19 лет. Для Западной Сибири выявляется четкий период потепления приблизительно до 2010-2015 гг., вызванный восходящими ритмами гармоник температуры воздуха 250, 88 и 40 лет, и сменяющий его период похолодания до 2030-2060 гг., вызванный нисходящими ритмами 250, 88 и 40 лет. Далее до 2100 г. наблюдаются более мелкие колебания температуры воздуха, вызванные совпадением

максимумов или минимумов гармоник с периодами 11, 19, и 40 лет, однако, фоновые значения температуры будут близки к современным. Полученные таким образом температурные кривые послужили основой для дальнейшего прогноза.

Для области распространения ММП, современная температура которых не превышает  $-1^{\circ}\text{C}$ , а мощность не более 25-30 метров долгосрочный прогноз динамики мерзлотных условий показал их высокую изменчивость, выразившуюся, в целом, в уменьшении их суровости. Максимальное значение температуры грунтов прогнозируется в 2010-2020 гг.: в этот период по всей глубине мерзлой толщи температура пород близка к  $0^{\circ}\text{C}$ . Начиная с 2020 - 2025 гг. ожидается понижение среднегодовой температуры пород.

Глубина сезонного оттаивания изменяется от 0,75 до 1,5 м. Прослеживается тенденция к постепенному сокращению СТС в будущем. Однако в период максимального повышения температуры воздуха и, как следствие, грунта в период 2010 - 2020 гг. отмечается разобщение слоя сезонного промерзания с ММП. Мощность талого прослоя невелика - около 0,2 -0,3 м. Динамика температуры воздуха приводит не только к изменению температурного режима всей толщи пород, но и вызывает их оттаивание снизу. К 2050 г. ММП могут оттаять снизу более чем на 1 м, после чего вновь начинается аградация ММП.

Для района распространения ММП, современная температура которых изменяется в пределах  $-1, \dots, -3^{\circ}\text{C}$  геокриологический прогноз изменения характеристик ММП за счет естественно-исторической динамики климата показал, что вслед за периодами относительного потепления или похолодания климата меняются и характеристики ММП, однако, чем ниже температура пород, тем эти изменения меньше. Согласно полученным результатам расчётов, в настоящее время глубина сезонного оттаивания близка к максимальной и до 2010 - 2015 гг. будет сохраняться приблизительно на этом уровне, после чего несколько сократится.

В районах распространения ММП с современной температурой порядка  $-3, \dots, -5^{\circ}\text{C}$  и ниже в результате естественных колебаний климата ни среднегодовые температуры пород, ни глубины сезонного оттаивания за расчётный период не выйдут за пределы современных градаций.

Результаты моделирования, приведённые на рис.1 и в таблице 1, позволяют проследить динамику изменения основных прогнозных параметров

многолетнемёрзлых пород при различных трендах повышения температуры воздуха при глобальном потеплении климата вследствие увеличения содержания в атмосфере парниковых газов. Так, в области распространения низкотемпературных грунтов северной геокриологической зоны с современной температурой ММП порядка  $-7.0 \dots -9.0^{\circ}\text{C}$  и ниже, оттаивания ММП с поверхности ожидать не следует даже при тренде потепления порядка  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , однако температура мёрзлых пород при таком тренде к концу следующего столетия может повыситься до  $-2.0 \dots -4.0^{\circ}\text{C}$ .

В пределах мерзлотно-температурной зоны, где современная температура ММП составляет  $-5.0 \dots -7.0^{\circ}\text{C}$ , незначительное оттаивание мёрзлых пород с поверхности при тренде  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , может начаться в 2080-2090гг. Массивы мёрзлых пород с современной температурой порядка  $-3.0 \dots -5.0^{\circ}\text{C}$  при тренде потепления  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$  начнут оттаивать в 2040-2060гг., при тренде  $0.05^{\circ}\text{C}/\text{год}$  в 2060-2070гг., при тренде  $0.04^{\circ}\text{C}/\text{год}$  в 2075-2085гг., при тренде  $0.03^{\circ}\text{C}/\text{год}$  позже 2080года.

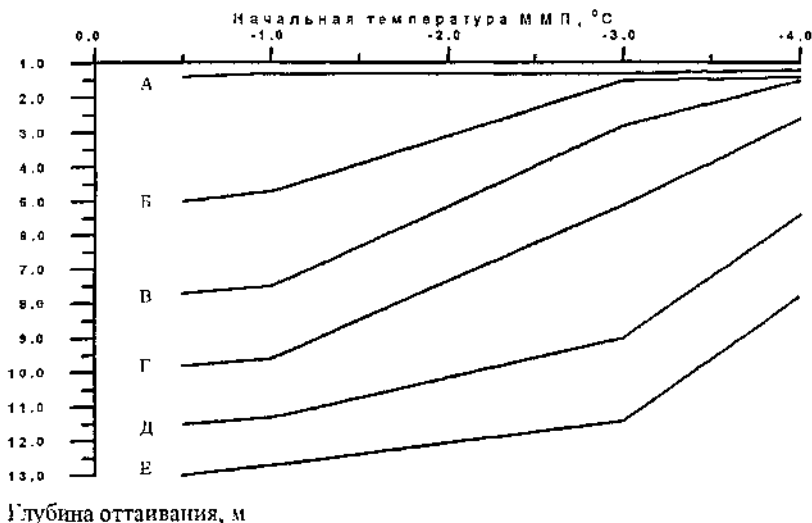


Рис. 1 Глубина оттаивания многолетнемёрзлых супесчано-суглинистых отложений на 2100-й год при их различной начальной температуре в зависимости от тренда потепления: А)  $0.01$ , Б)  $0.02$ , В)  $0.03$ , Г)  $0.04$ , Д)  $0.05$ , Е)  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ .

Таблица 1

Прогнозные характеристики ММП на 2100-й год при различных трендах повышения среднегодовой температуры воздуха (1 - при тренде  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , 2 -  $0.03^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , 3 -  $0.01^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ).

Состав ММП	$t_0, ^{\circ}\text{C}$	Прогнозная температура пород, $t_{2100}, ^{\circ}\text{C}$			Время начала оттаивания ММП, гг.			Глубина оттаивания, м			
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
пески					Оттаивания ММП не происходит			Сезонное, не более 1.5	Сезонное, не более 1.0	Сезонное, не более 0.5	
супеси и суглинки	-7.0.... -9.0	-2.0.... -4.0	-5.0.... -7.0	-6.0.... -8.0							
торф											
пески					2080-2090	Оттаивания ММП не происходит	до 6.0	сезонное, не более 1.2	сезонное, не более 0.		
супеси и суглинки	-5.0.... -7.0	-1.0.... -2.0	-2.0.... -4.0	-4.0.... -6.0			до 3.5				
торф							до 1.5				
пески					2050-2070	2080-2100	Оттаивания ММП не происходит	до 6.0	до 6.0	Сезонное, не более 1.2	
супеси и суглинки	-3.0.... -5.0	-0.5.... -1.0	-1.0.... -2.0	-2.0.... -4.0				3.5 - 8.0			до 4.0
торф					2010-2040	2030-2080	Оттаивания ММП не происходит	1.5 - 3.5	до 2.0	Сезонное, не более 1.2	
пески								13.0 - 20.0	10.0-15.0		
супеси и суглинки	-1.0.... -3.0	0.... -0.5	0.... -1.0	-0.5.... -2.0				8.0 - 15.0	3.5 - 8.0		
торф					2000-2010	2010-2030	2060-2090	3.5 - 5.5	до 4.0	Сезонное, не более 1.5	
пески		Около 0						15.0-25.0	13.0-20.0		10.0-15.0
супеси и суглинки	0.... -1.0							10.0- 16.0	7.5 - 12.0		1.5 - 3.5
торф					4.0 - 6.0	до 5.0	до 1.5				

При температуре ММП, современное значение которой составляет  $-1.0.... -3.0^{\circ}\text{C}$  к 2100-му году оттаивание при высоких трендах потепления может начаться уже в 2010-2030 гг., а температура ММП может повыситься до значений от  $0.... -0.5$  до  $-0.5.... -2.0^{\circ}\text{C}$ .

В той части криолитозоны, где современная температура ММП изменяется от 0 до  $-1.0^{\circ}\text{C}$ , многолетнее оттаивание может начаться уже в 2000 - 2010 гг. при тренде потепления  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$  и в 2060 - 2090гг. при тренде  $0.01^{\circ}\text{C}/\text{год}$ . Температура ММП в этой области при реализации любого из рассматриваемых вариантов потепления будет близка к нулю.

Результаты расчетов позволили выявить некоторые пространственно-временные закономерности процесса деградации рассматриваемых регионов криолитозоны позволяющие установить количественные оценки интенсивности деградации ММП при их разной начальной среднегодовой температуре ( $t_0$ ) на любой момент времени от начала повышения температуры воздуха для пород различного состава.

Период времени от начала потепления климата ( $\tau$ ), в течение которого среднегодовая температура ММП повысится до  $0^{\circ}\text{C}$  (в дальнейшем начнется прогрессирующее оттаивание ММП), прямо пропорционален среднегодовой температуре ММП на момент

начала потепления климата ( $t_0$ ), взятой по модулю, и обратно пропорционален тренду потепления ( $t$ ) и может быть рассчитан по уравнению:  $\tau = A |t_0| / t$ , где  $A$  - коэффициент, зависящий от тренда повышения температуры воздуха, может быть получен по графику зависимости времени начала оттаивания ММП от их начальной среднегодовой температуры для каждого темпа потепления климата. Расчеты показали, что для  $t = 0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$   $A = 1,13$ , для  $t = 0.045^{\circ}\text{C}/\text{год}$   $A = 2.48$ .

Изменение среднегодовой температуры ММП в будущем существенно зависит от их начальной температуры (рис.2). При относительно высоких начальных температурах ММП большая часть поступающего в грунт тепла идет на фазовые переходы при опускании кровли ММП и поэтому повышение температуры ММП относительно медленное. При низких исходных температурах ММП интенсивность повышения их температур увеличивается.

Расчеты показали, что при тренде потепления  $0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$  скорость многолетнего оттаивания мерзлого торфа составит около 6 см/год, суглинка - 13 см/год, песка - 20 см/год (рис.3).

Возможна также деградация подошвы ММП, залегающей на глубинах менее 200 метров (таб.2).

Табл.2 Возможное оттаивание подошвы ММП при тренде потепления  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ .

Мощность ММП, м	Время начала оттаивания, годы	Величина оттаивания ММП снизу, м
250	более 110	-
200	90-100	0.1-0.2
150	60-80	0.1-0.5
100	30-40	0.5-1.0
50	20-30	1.0-2.0
25	3-5	2.0-3.0
15	менее 3	больше 3.0

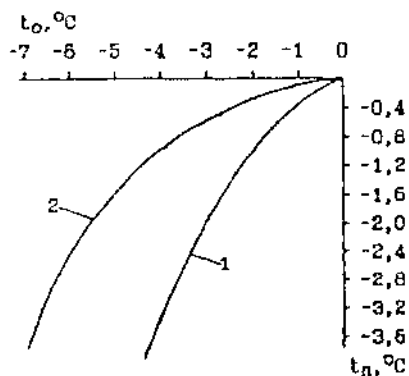


Рис.2 Зависимость прогнозной среднегодовой температуры ММП ( $t_0$ ) от их начальной среднегодовой температуры ( $t_n$ ) через 50 (1) и 100 (2) лет от начала потепления климата с трендом  $0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ .

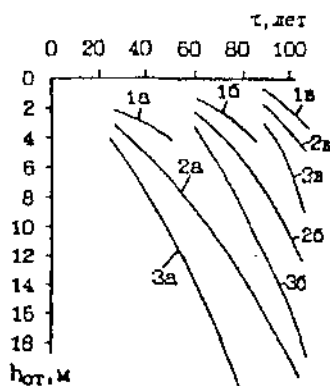


Рис.3 Зависимость глубины оттаивания ММП ( $h_{от}$ ) от времени с начала потепления климата ( $\tau$ ) с трендом  $0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$  для торфа (1), суглинка (2) и песка (3) при разной начальной среднегодовой температуре ММП: а -  $t_n = -1^{\circ}\text{C}$ , б -  $t_n = -3^{\circ}\text{C}$ , в -  $t_n = -5^{\circ}\text{C}$ .



## Глава 5. Потенциальная возможность развития термокарста на севере Европейской части России и в Западной Сибири в связи с возможными климатическими изменениями

Для оценки возможности развития термокарста на участках развития, был рассмотрен ряд двухмерных задач, при различных вариантах строения разреза отложений, мощности ледяных жил и размеров полигонов в широком спектре начальных температур ММП. При этом, согласно существующим представлениям, о динамике и условиях развития термокарста сформулируем основные соображения, использованные нами при постановке и решении прогнозных задач:

- 1) Результаты расчетов изменения температурного поля пород северных регионов России показывают, что глубина оттаивания ММП может в значительной мере превышать глубину залегания сильнольдистых пород;
- 2) При оттаивании массивов сильнольдистых многолетнемёрзлых пород происходит их осадка за счёт мономинеральных или текстуробразующих льдов;
- 3) Породы, вмещающие ледяные жилы, могут быть как просадочными, так и непросадочными, однако осадка поверхности пород над вытравивающей жилой происходит всегда, когда глубина оттаивания достигает ледяной жилы;
- 4) Оттаивание и осадка отложений может происходить как без образования водоёма на поверхности, так и с образованием бессточного термокарстового озера;
- 5) Глубина образующегося водоёма увеличивается прямо пропорционально величине осадки подстилающих отложений;
- 6) Существующий водоём моделируется посредством задания теплофизических свойств воды и льда на месте осевших отложений без учёта конвективного теплообмена в толще воды, на поверхности которого зимой существует снежный покров, а летом - открытое зеркало водоёма;
- 7) Встровое перераспределение снега или заполнение снегом образующихся понижений не учитывается, т.к. на данном этапе исследований установление чёткой зависимости изменений климата, осадки поверхности и прогнозной мощности снежного покрова представляется проблематичным.

Анализ результатов расчётов позволяет сформулировать два принципиальных соображения: во-первых, в том случае, если при осуществлении прогнозов термокарста учитывается линейный тренд повышения температуры воздуха, то заполнением образующегося понижения водой можно пренебречь; и наоборот, в тех случаях, когда термокарстовое понижение не заполняется водой, прогрессирующий характер оттаивания отложений будет напрямую определяться неизменностью тренда повышения температуры воздуха, исключая периоды похолоданий или отдельные холодные годы (зимы). Поэтому, при решении одномерного варианта задачи, предполагающего осадку поверхности за счёт вытаивания текстуробразующих льдов, мы не рассматривали возможность образования и накопления воды в пределах новообразованной поверхности. При этом изучались все мерзлотно-температурные зоны Европейского Севера и Западной Сибири; моделирование проводилось для разрезов, сложенных супесчано-суглинистыми отложениями, для различных трендов возможного повышения среднегодовой температуры воздуха: от 0.01 до 0.06 °С/год.

В результате оттаивания массивов супесчано-суглинистых отложений можно ожидать осадку их дневой поверхности (таб.3), в основном за счёт вытаивания текстуробразующего льда (за исключением областей, в разрезе которых находятся мономинеральные ледяные тела).

Расчёты показали, что осадку поверхности в результате оттаивания ММП можно ожидать даже в областях, где современная температура пород составляет -5.0.....-7.0°С . При этом осадка поверхности будет зависеть от глубины оттаивания, которая определяется начальной температурой ММП, трендом потепления и льдистостью оттаивающих пород. Диапазон изменения величин осадок может быть очень высок: так, например, в области с современной температурой от 0 до -1.0°С к 2100-му году этот разброс значений возможной осадки может достигать 6 м и более. Со времени начала многолетнего оттаивания и осадки оттаивающих отложений можно говорить о том , что с этого момента потенциально возможно зарождение и развитие термокарста.

Таблица 3

Величины потенциальных осадок мёрзлых супесчано-суглинистых отложений в зависимости от различных трендов повышения среднегодовой температуры воздуха: (1-  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , 2-  $0.03^{\circ}\text{C}/\text{год}$ , 3-  $0.01^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ).

$t_0, ^{\circ}\text{C}$	Льдистость пород	Величина потенциальной осадки отложений, м		
		1	2	3
-7.0.....-9.0		Осадок не происходит		
-5.0.....-7.0	более 0.4	до 1.5	Осадок не происходит	
	0.2 - 0.4	0.7 - 1.4		
	менее 0.2	до 0.5		
-3.0.....-5.0	более 0.4	1.5 - 3.5	0.5 - 1.0	Осадок не происходит
	0.2 - 0.4	0.7 - 1.5	до 0.5	
	менее 0.2	до 0.7	до 0.1	
-1.0.....-3.0	более 0.4	3.5 - 6.0	1.0 - 1.5	Осадок не происходит
	0.2 - 0.4	1.5 - 3.5	0.5 - 1.0	
	менее 0.2	до 1.5	до 0.5	
0.....-1.0	более 0.4	5.5 - 6.5	3.5-5.0	до 0.5
	0.2 - 0.4	3.5 - 5.5	1.5-3.5	до 0.3
	менее 0.2	до 3.5	до 0.5	до 0.1

Глава 6. Карты прогноза геокриологических условий Европейского Севера России и Западной Сибири в связи с естественной динамикой климата и с учётом глобального потепления за счёт увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере

Результаты математического моделирования позволили составить карты прогноза температуры и глубины оттаивания ММП, и потенциальной осадки супесчано-суглинистых отложений в связи с естественной динамикой климата и с учётом глобального потепления за счёт увеличения концентрации парниковых газов в

атмосфере для Европейского Севера и Западной Сибири на 2100-й год, масштаба 1:2 500 000.

Для Западно-Сибирской плиты отмечается большое разнообразие геокриологических условий; на прогнозной карте выделяются 12 областей - от таких, где ни осадка поверхности пород, ни оттаивание ММП не ожидается, расположенных на Ямале и Гыдане, до областей южной геокриологической зоны, где осадка высокольдистых отложений с высокой современной температурой может достигать 5.5 - 6.5 метров, а глубина оттаивания в песках может достигать 20 - 25 м. Карта содержит сведения о том, как изменится температура грунтов к 2100-му году, когда начнётся оттаивание ММП и на какую глубину, а также на какую величину произойдёт осадка поверхности при различных трендах повышения температуры воздуха (0.06, 0.03 и 0.01 °C/год). Кроме того, на карте выделена область, где в результате прогнозируемого с помощью гармонического анализа естественно-исторического хода температуры воздуха, т.е. без наложения на неё тренда потепления, возможно образование несливающейся мерзлоты в области распространения ММП в отдельные тёплые годы (2010 - 2020 гг.) или перелетков мёрзлых пород в области распространения талых массивов (2030 - 2040 гг.). Значения начальной льдистости супесчано - суглинистых грунтов для прогнозной карты составили три градации: менее 0.2, 0.2 - 0.4 и более 0.4.

Для Европейского Севера России по характеру изменения температурного поля ММП и осадке оттаивающих отложений выделяется 6 областей. В трёх из них, где на дневную поверхность выходят массивы скальных пород, осадка поверхности не произойдёт, однако в зависимости от начальных (современных) условий глубина и время начала оттаивания будут различными. Осадку поверхности супесчано - суглинистых пород в зависимости от тренда потепления будет изменяться от 0 до 1 - 2 м на северо - востоке территории, до 1 - 4 м в пределах южной криолитозоны. Также выделяется область, где в результате прогнозируемого с помощью гармонического анализа естественно-исторического хода температуры воздуха возможно образование как несливающейся мерзлоты в области распространения ММП в отдельные тёплые годы (2005 - 2015 гг.), так и перелетков мёрзлых пород в области распространения талых пород (2045 - 2055 гг.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований, отражающие новизну, теоретическую и практическую значимость диссертационной работы заключающиеся в следующем:

1) Путём усовершенствования и адаптации известных математических приёмов и методов обработки числовых рядов разработан новый методический подход к назначению температуры воздуха при долгосрочном геохронологическом прогнозировании. Методический подход подразумевает следующую последовательность обработки метеоданных:

- сглаживание с интервалом 10 лет;
- удлинение коротких рядов метеонаблюдений (приведением их к ближайшему длинному ряду);
- гармонический анализ (разложение);
- прогноз естественно-исторический;
- прогноз, учитывающий антропогенное потепление климата.

2) На основе гармонического анализа данных метеонаблюдений и прогнозных расчётов установлено, что в результате естественно-исторической динамики климата на территории Европейского севера России и в Западной Сибири выявляется отчётливый период потепления (2005-2020 гг.), когда в районах с высокотемпературными ММП возможно разобитие слоя сезонного промерзания с мёрзлыми толщами, сменяющийся к середине XXI в. периодом похолодания, когда в районах с тальми породами, температура которых близка к нулю, возможно образование перелетков.

3) Ширина области образования перелетков и несливающейся мерзлоты за счёт естественной динамики климата в Западной Сибири составит 500-600 км, на Европейском Севере 150-300 км.

4) Выявлены частные (двухсторонние) количественные закономерности изменения геохронологических характеристик (время начала оттаивания ММП, прогнозная температура пород, глубина оттаивания ММП и их потенциальная осадка, положение подошвы ММП) от начальной среднегодовой температуры пород и темпа потепления климата за счёт увеличения содержания парниковых газов в атмосфере применительно к ММП разного состава и льдистости.

5) В зависимости от возможного тренда глобального потепления климата к 2100-му году южная граница ММП может сместиться к северу в Западной Сибири при тренде потепления  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$  на 400-500 км, при тренде потепления  $0.01^{\circ}\text{C}/\text{год}$  на 100-400 км; на Европейском Севере при тренде потепления  $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$  практически на всей территории за исключением северо-восточных областей отмечается протавивание ММП с поверхности, при тренде  $0.01^{\circ}\text{C}/\text{год}$  южная граница ММП сместится к северу на 150-350 км.

6) Установленные закономерности свидетельствуют о сравнительно высокой пространственно-временной изменчивости криолигозоны исследованных территорий в результате как природных изменений температуры воздуха, так и (в особенности) при потеплении климата за счёт увеличения содержания в атмосфере парниковых газов, что отражено на прогнозных геокриологических картах.

#### Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Деграляция криолигозоны России при глобальном потеплении климата. Материалы первой конференции геокриологов России. Кн.2., МГУ, 1996 (совместно с Э.Д. Ершовым, А.Н. Козловым, С.Ю. Пармузиным).
2. Динамика криолигозоны в связи с естественно-историческими и антропогенными изменениями климата. "Ломоносовские чтения". Тезисы докладов. МГУ, 1996 (совместно с С.Ю. Пармузиным, Е.В. Жирновой, А.Н. Козловым, Т.Ю. Шаталовой).
3. Глобальное потепление климата и возможность развития термокарста. "Ломоносовские чтения". Тезисы докладов. МГУ, 1999 (совместно с С.Ю. Пармузиным, А.В. Медведевым).
4. Прогноз термокарста при возможном глобальном потеплении климата. Международная конференция "Мониторинг криосферы" РАН. Тезисы докладов. Пушкино, 1999 (совместно с С.Ю. Пармузиным, А.В. Медведевым, В.А. Аверкиной).
5. Пространственно-временная динамика многолетнемерзлых пород Европейского севера России и Западной Сибири в XXI веке в связи с возможными изменениями климата. "Вестник Московского Университета" серия геология (в печати).

*М. Кемеров*