

На правах рукописи

Шерстюков Артём Борисович

**СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ РОССИИ И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ  
ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ  
И ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 25.00.36 – геоэкология

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва 2008

Работа выполнена в Государственном учреждении «Институт глобального климата и экологии» Росгидромета и РАН

Научный руководитель: доктор географических наук  
Анохин Юрий Андреевич

Официальные оппоненты: доктор географических наук,  
профессор  
Голубев Владимир Николаевич  
  
доктор географических наук  
Анисимов Олег Александрович

Ведущая организация: Институт географии РАН

Защита диссертации состоится « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2008 г. в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.049.01 в ГУ Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН по адресу: 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20-Б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГУ Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН.

Автореферат разослан « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор географических наук

Г. М. Черногаева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Изменения глобального климата привели на территории России к заметным последствиям в жизнедеятельности человека. Начиная с середины 1960-х годов в России преимущественно отмечается потепление климата.

В зоне многолетней мерзлоты изменения наземного климата оказывают влияние на состояние почвогрунтов и могут сопровождаться негативными последствиями для зданий и инженерно-технических сооружений, включая трубопроводы. Сооружения в этой зоне построены на мерзлых почвогрунтах, прочностные свойства которых зависят от их термического состояния. Вопрос о возможной деградации мерзлоты имеет особую практическую значимость.

Публикации разных лет и разных авторов не всегда согласуются между собой в части оценок изменений термического состояния почвогрунтов за последние десятилетия. Противоречия, в основном, определяются использованием ограниченного числа станций наблюдений, короткими рядами или отсутствием данных за последние годы с наиболее интенсивными изменениями климата. Исследования, выполненные разными авторами с помощью моделей, менее противоречивы, но, тем не менее, их результаты нуждаются в сопоставлении с данными прямых измерений температуры почвогрунтов на сети метеорологических станций.

Для получения надежных оценок с учетом пространственных особенностей необходимо привлечение данных всех имеющихся наблюдений за температурой почвогрунтов. В настоящем диссертационном исследовании использовались все существующие данные наблюдений за температурой почвогрунтов по станциям Росгидромета.

Теоретической и методологической основой исследования послужили научные и прикладные труды Ю.А. Израэля, Г.В. Груза, О.А. Анисимова, А.А. Величко, В.П. Нечаева, Э. Д. Ершова, Л. Н. Хрусталева, В.Н. Конищева, В.А. Кудрявцева, К.А. Кондратьевой, С.П. Малевского-Малевица, В.П. Мельникова, А.В. Павлова, Г.В. Малковой, С.М. Чудиновой, Н.А. Цытовича, В.Е. Романовского и др.

Актуальность темы определяется продолжающимся изменением климата, влиянием этих изменений на уникальную составляющую среды обитания человека – многолетнюю мерзлоту, и недостатком количественных оценок региональных последствий этих изменений, в условиях активизации хозяйственной деятельности в Сибири и на Дальнем Востоке.

Географический район исследования.

Многолетняя мерзлота – подземное оледенение, охватывающее север ЕТР и Западной Сибири, большую часть Восточной Сибири и север Дальнего востока. Территория распространения многолетней мерзлоты России велика, но наибольшее потепление за последние десятилетия произошло в южных районах Сибири вблизи границы многолетней мерзлоты. Роль изменения климата в этих районах усиливается неустойчивым состоянием мерзлоты на границе этой зоны. Учитывая, что в зоне распространения многолетней

мерзлоты основная часть населения живет в южных районах, последствия изменений климата для человека там могут оказаться наиболее существенными. Перечисленные факторы определили выбор региона исследований – зона многолетней мерзлоты и особенно южные части Западной и Восточной Сибири.

Кроме того, в Сибири сконцентрированы значительные природные богатства России и объекты добывающей промышленности. По Сибири проходят крупнейшие газопроводы и нефтепроводы, а также строятся новые. Строительство нефтепровода “Восточная Сибирь - Тихий Океан” (ВСТО), по которому будет экспортироваться нефть в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, уже началось, а строительство газопровода «Алтай» планируется начать в 2008 году. Наличие мерзлых почвогрунтов определило специфику строительства в районах распространения многолетней мерзлоты всех промышленных и жилых объектов. Возможная деградация мерзлоты и ослабление несущей способности фундаментов всех сооружений создают угрозу зданиям, трубопроводам и мостам, построенным на мерзлоте.

Целью работы является исследование влияния современных изменений климата на термическое состояние почвогрунтов в районах распространения многолетней мерзлоты России и вблизи ее границ, а также выделение регионов возможного риска для устойчивости существующих и проектируемых инженерно-технических сооружений.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Создание массива данных наблюдений за температурой почвогрунтов на метеорологических станциях России за многолетний период (1965 – 2006 гг.) на глубинах 80, 160, 240 и 320 см.

2. Анализ влияния различных характеристик меняющегося климата на изменение температуры почвогрунтов с привлечением всей сети станций Росгидромета на территории РФ.

3. Оценка современных региональных изменений наземного климата и получение количественных оценок изменения термического состояния почвогрунтов в выбранном регионе.

4. Анализ временных корреляций между элементами наземного климата и температурой почвогрунтов, анализ трендов температуры почвогрунтов и географического положения характерных изотерм почвогрунтов.

5. Исследование изменений глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов и возможного влияния этих изменений на несущую способность зданий и инженерно-технических сооружений.

6. Визуализация результатов исследования с помощью построения карт на основе ГИС-технологий.

Объектом исследования являются современные изменения термического состояния многолетней мерзлоты России.

Предметом защиты диссертационной работы являются сведения о климатозависимых изменениях температуры почвогрунтов на глубинах до 320 см в зоне многолетней мерзлоты и вблизи ее границ.

Методы исследования

Перечисленные задачи решаются с использованием метода корреляционного анализа, метода регрессионного анализа, расчета аномалий и трендов с оценкой статистической достоверности полученных результатов. Для географической привязки данных, для пространственного анализа полученных результатов и для построения карт применяются технологии Геоинформационных Систем (ГИС).

Исходные данные для обработки

Использовались результаты наблюдений по всей сети станций Росгидромета с непрерывными данными о температуре воздуха (1612 станций), количестве атмосферных осадков (1612 станций), о высоте снежного покрова (577 станций), о температуре почвогрунтов на глубинах 80 - 320 см по вытяжным термометрам (461 – 612 станций) за период 1965 – 2006 гг.

Научная новизна результатов и личный вклад автора

Научная новизна работы и полученных результатов основывается на всестороннем анализе современных данных обширной сети метеостанций России. Это дало возможность исследовать региональные особенности изменений температурного режима почвогрунтов, не выявленные ранее по данным геокриологических стационаров. Впервые в работе использовались ежедневные данные о температуре почвогрунтов. Впервые созданы массивы данных по температуре почвогрунтов до глубины 320 см по всей сети станций и выполнен их анализ. Построены территориально-детализированные карты распределения коэффициентов временной корреляции между температурой почвогрунтов, температурой воздуха и высотой снежного покрова с определением достоверного вклада каждого из параметров в многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов.

В диссертации изложены результаты полученные лично автором:

1. Впервые по всей сети метеорологических станций Росгидромета с непрерывными данными получены оценки трендов среднегодовой температуры почвогрунтов на глубинах 80 - 320 см за последние 40 лет, построены карты территориального распределения коэффициентов этих трендов.

2. Получены количественные оценки вклада изменений температуры воздуха и высоты снежного покрова в изменения температуры почвогрунтов на глубинах до 320 см. Выделены регионы с преобладающим влиянием снежного покрова на среднегодовую температуру почвогрунтов, а также регионы с преобладающим влиянием температуры воздуха на среднегодовую температуру почвогрунтов.

3. Впервые по данным наблюдений до глубины 320 см построены карты на 2006 год положения изотермы, характерной для границы островной многолетней мерзлоты и даны оценки ее смещения к северу за 1976 - 2006 годы.

4. Впервые по данным ежедневных наблюдений получены оценки многолетнего изменения максимума и минимума годового хода температуры почвогрунтов на глубинах 80 – 320 см и глубины сезонного протаивания.

5. Впервые по данным наблюдений всей сети станций в зоне мерзлоты выделены районы с преобладающим климатообусловленным увеличением глубины сезонного протаивания почвогрунтов, являющейся важнейшей характеристикой несущей способности построенных и проектируемых на мерзлоте инженерно-технических сооружений.

#### Практическая значимость полученных результатов.

Созданный массив данных по температуре почвогрунтов на глубинах использовался при выполнении НИР ГУ «ИГКЭ» и ГУ «ВНИИГМИ-МЦД».

Результаты работы использовались в “Обобщающем докладе об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации”, том II, “Последствия изменений климата” (доклад Росгидромета 2008 г.).

Материалы диссертации частично были выполнены по гранту РФФИ №07-05-00417а

Результаты работы могут быть использованы при проектировании и закладке фундаментов зданий и сооружений согласно существующим СНиП с учетом современных и ожидаемых изменений термического состояния почвогрунтов.

#### Защищаемые положения

1. Изменения температуры почвогрунтов в зоне многолетней мерзлоты России за последние четыре десятилетия.
2. Оценки влияния многолетних изменений температуры воздуха и высоты снежного покрова на среднегодовую температуру почвогрунтов на Европейской территории России и в Сибири.
3. Оценки многолетнего изменения географического положения критериальной изотермы в почвогрунтах, характеризующей границы островной мерзлоты.
4. Оценка тенденций глубины сезонного протаивания почвогрунтов с учетом современных и будущих изменений климата, а также возможных сопутствующих негативных последствий.

#### Апробация работы

Основные результаты исследований докладывались на научных семинарах, Российских и международных конференциях, важнейшими из которых являются:

1. Вторая Всероссийская конференция “Научные аспекты экологических проблем России” (29 - 31 мая 2006 г., Москва),

2. Вторая конференция молодых ученых национальных гидрометслужб государств - участников СНГ “Новые методы и технологии в гидрометеорологии” (2 - 3 октября 2006 г., Москва),
3. Региональная университетская научно-практическая конференция (12 - 17 февраля 2007 г., Калуга, КГПУ имени К.Э. Циолковского),
4. Международная конференция “Криогенные ресурсы полярных регионов” (17 - 21 июня 2007 г., Салехард),
5. American Geophysical Union Fall Meeting (10 – 14 декабря 2007 г., Сан-Франциско),
6. Международная конференция “Криогенные ресурсы Полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения” (21 - 24 апреля 2008 г., Тюмень).

Благодарности. Автор выражает признательность научному руководителю, д.г.н. Ю.А. Анохину, за постоянное внимание к работе, а также коллегам из отдела исследования региональных последствий изменений климата Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН и сотрудникам отдела климатологии ВНИИГМИ – МЦД, под руководством к.ф.-м.н. В.Н. Разуваева, за предоставление архивов данных метеорологических наблюдений, необходимых для создания массивов по температуре почвогрунтов.

#### Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ в т.ч. 2 работы в изданиях рекомендованных ВАК.

#### Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из четырех глав, введения и заключения, содержит 43 рисунка и 11 таблиц. Общий объем работы составляет 138 страниц. Список цитируемой литературы состоит из 108 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, определяются объект и предмет исследования, положения, выносимые на защиту, указываются основные методы исследований.

В **первой главе “Изменения климата, методы анализа и оценки региональных последствий”** кратко описывается состояние вопроса и постановка задачи, перечислены логические этапы проведения диссертационного исследования, описаны основы технологии подготовки массивов данных по наблюдениям на станциях Росгидромета, результаты анализа изменений климата по данным о температуре воздуха, количестве атмосферных осадков и высоте снежного покрова за последние 30 и более лет,

использованные средства геоинформационных технологий для представления результатов.

По данным полной сети метеорологических станций России (1612 станций) выполнен детальный пространственный анализ особенностей изменения наземного климата. По наблюдениям за период глобального потепления 1976 – 2006 гг. показано (рис. 1), что на территории РФ наиболее интенсивное и статистически значимое увеличение температуры воздуха произошло на Европейской территории России (ЕТР) (кроме севера), на юге Западной Сибири, на всех широтах в Восточной Сибири, в Приамурье, на Камчатке и на севере Дальнего Востока.

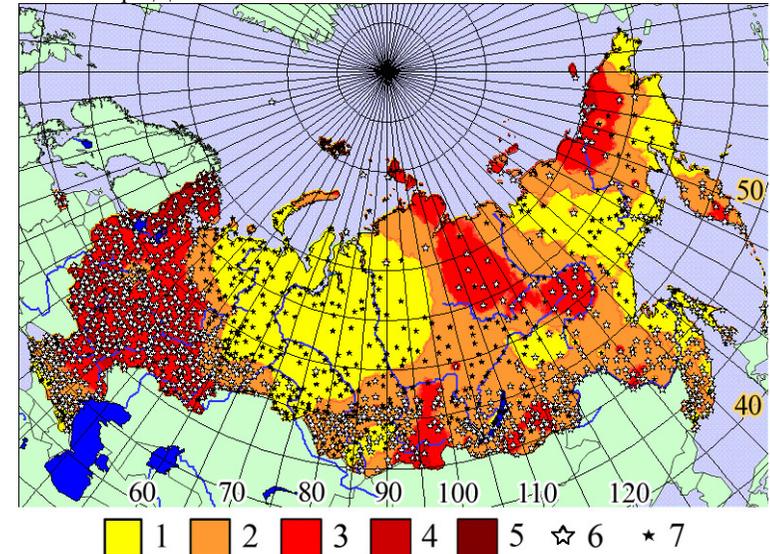


Рис. 1. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры воздуха за 1976 - 2006 гг. (°С за 10 лет)  
1 –  $0.1 \leq k < 0.4$ , 2 –  $0.4 \leq k < 0.5$ , 3 –  $0.5 \leq k < 0.6$ , 4 –  $0.6 \leq k < 0.7$ ,  
5 –  $0.7 \leq k < 0.8$ , 6 – станции с достоверностью тренда  $\geq 95\%$ ,  
7 – станции с незначимым трендом

Анализ трендов количества осадков по тем же станциям за 1976 – 2006 гг. показал, что в целом на территории России преобладает слабое увеличение годовых сумм осадков. При этом статистически более достоверно увеличение количества осадков наблюдалось в холодное полугодие на юге Западной и Восточной Сибири и в Приуралье. Оценка достоверности трендов проводилась на основе критерия Стьюдента.

Изменение высоты снежного покрова оценивалось по величине отклонения средней высоты за 1991 – 2005 годы от нормы высоты за 1961 –

1990 гг. за все месяцы года со снегом. Обработано 577 станций. Анализ аномалий высоты снежного покрова показал, что значимые положительные аномалии наблюдаются на преобладающей части территории России. При этом наиболее существенные положительные аномалии зафиксированы в восточной части ЕТР, на обширных территориях Западной и Восточной Сибири, в Приморье и на Камчатке.

Приведенные сведения об изменениях различных показателей современного климата являются обоснованием для исследований связанных с ними геоэкологических последствий. Необходимо отметить, что по всем важнейшим метеорологическим характеристикам (температура, осадки, снежный покров) в Сибири произошли самые существенные изменения. Следовательно, в Сибири, в зоне многолетней мерзлоты могут возникать наиболее серьезные последствия изменений климата.

Во второй главе **“Зависимость температуры почвогрунтов от наземных климатических условий”** представлены результаты исследования возможной деградации многолетней мерзлоты, как одного из последствий изменения наземного климата в районах распространения многолетней мерзлоты.

Рассмотрена зависимость температуры почвогрунтов от атмосферных климатических условий и некоторые особенности проникновения волн годового хода температуры на различные глубины в почвогрунтах.

В начале главы приведены оценки границ зоны многолетнемерзлых почвогрунтов по данным о температуре воздуха. Для анализа температуры воздуха использовались данные всех 1612 действующих метеорологических станций России. Оценки состояния многолетней мерзлоты по наблюдениям за температурой воздуха являются косвенными, но преимущества таких оценок заключаются в более густой сети метеорологических станций по сравнению с данными вытяжных термометров о температуре почвогрунтов или по сравнению с наблюдениями на геокриологических стационарах. Густота станций с данными о температуре воздуха примерно в три раза больше, чем с данными о температуре почвогрунтов.

Условия, благоприятные для существования многолетней мерзлоты, определялись по индексу суровости климата В.П.Нечаева ( $I$ ), который представляет собой частное от деления температуры воздуха самого холодного месяца (января) на температуру самого теплого месяца года (июля).

Значениям индекса менее -1.0 соответствуют благоприятные условия для существования островной и прерывистой мерзлоты.

Индекс суровости  $I$  вычислялся за период 1961 - 1990 и, отдельно, за период 1991 - 2005 гг. На рис. 2. показаны площади, занятые значениями  $I < -1$  в 1961 - 1990 годах и в 1991 - 2005 годах. Показано, что за последние 15 лет, по сравнению с нормой, площадь регионов с климатическими условиями ( $I < -1$ ), благоприятными для существования мерзлых почвогрунтов, сократилась примерно на 30%.

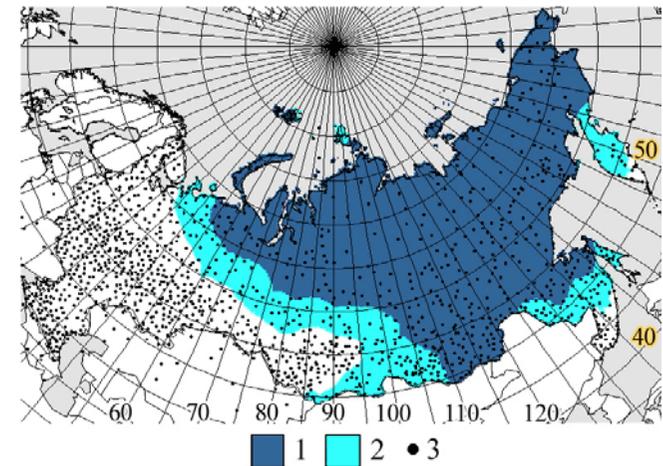


Рис. 2. Пространственное распределение индекса суровости климата В.П.Нечаева ( $I<-1>$ )

1 – районы благоприятные для существования мерзлоты ( $I<-1>$ ) в 1961 – 1990 гг. и сохранившиеся в 1991 – 2005 гг., 2 – районы благоприятные для существования мерзлоты ( $I<-1>$ ) в 1961 – 1990 гг., но не сохранившиеся в 1991 – 2005 гг., 3 – метеостанции

Передача температурных колебаний из воздуха в почву и распространение волн годового хода в почвогрунтах от поверхности на глубины (согласно закону теплопроводности Фурье) происходит с отставанием по фазе и с уменьшением амплитуды колебаний по мере увеличения глубины.

Величина сдвига годового хода температуры почвогрунтов между двумя уровнями рассматривается как обобщенная оценка теплофизических свойств почвогрунтов.

Ежедневные наблюдения за температурой почвогрунтов на метеостанциях по вытяжным термометрам до глубины 320 см за 1977 – 2006 гг. позволили определить сдвиг фазы годового хода (запаздывание) температуры на уровнях 160 и 320 см относительно уровня 80 см. По асинхронным корреляциям между 80 и 160 см, а также между 80 и 320 см вычислялось запаздывание (в сутках) распространения годового хода на глубины. Расчеты сдвигов выполнены по 574 станциям России для глубин 80 - 160 см и по 461 станции для глубин 80 – 320 см. На рис. 3. показаны значения запаздывания годового хода на глубине 320 см относительно годового хода на глубине 80 см. Карта рис.3 показывает, что в зоне многолетней мерзлоты наблюдается аномально большое запаздывание и оно составляет 60 - 80 суток и более, а в других областях запаздывание 50 - 60 суток или менее 50 суток.

Большое запаздывание по фазе годового хода в зоне мерзлоты показывает anomальные свойства почвогрунтов в этой зоне.

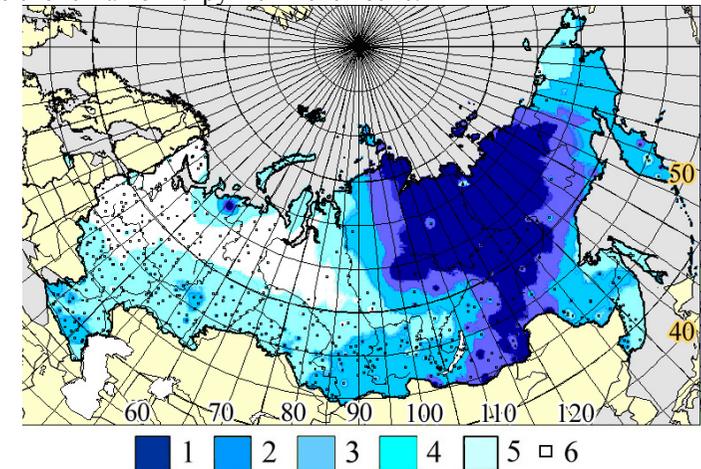


Рис. 3. Сдвиг ( $d$  - запаздывание в днях) годового хода температуры на глубине 320 см относительно годового хода на глубине 80 см.  
 1 –  $d \geq 80$ , 2 –  $70 \leq d < 80$ , 3 –  $60 \leq d < 70$ , 4 –  $50 \leq d < 60$ ,  
 5 –  $d < 50$ , 6 – метеостанции

Таким образом, выявлено, что в зоне мерзлоты сложились некоторые особые свойства почвогрунтов, отличные от свойств в других регионах, влияние которых замедляет проникновение волны годового хода из вышележащих слоев в нижележащие.

В следующем разделе главы рассматриваются корреляции температуры почвогрунтов на разных глубинах с температурой воздуха и высотой снежного покрова. На основе анализа корреляций по данным инструментальных наблюдений за 40 лет выявлено:

а) летом зависимость между температурой почвогрунтов на глубинах от 80 до 320 см и температурой воздуха является положительной с коэффициентами корреляции от 0.4 до 0.6 и статистически достоверной на большей части территории России за исключением центральной части зоны многолетней мерзлоты (северная половина Восточной Сибири).

б) зимой значимые коэффициенты корреляции температуры почвогрунтов с температурой воздуха наблюдаются преимущественно на Восточно - Европейской равнине. На остальной территории РФ такие оценки близки к нулю на всех рассмотренных глубинах.

с) между зимней температурой почвогрунтов на глубинах и высотой снежного покрова в феврале преобладают значимые положительные коэффициенты корреляции от 0.4 до 0.6 на Азиатской части России. А на ЕТР

зимой такие коэффициенты корреляции преимущественно менее 0.3 и статистически незначимы.

В дополнение к полученным коэффициентам корреляции получены оценки вклада среднегодовой температура воздуха и высоты снежного покрова в изменения температуры почвогрунтов (рис. 4).

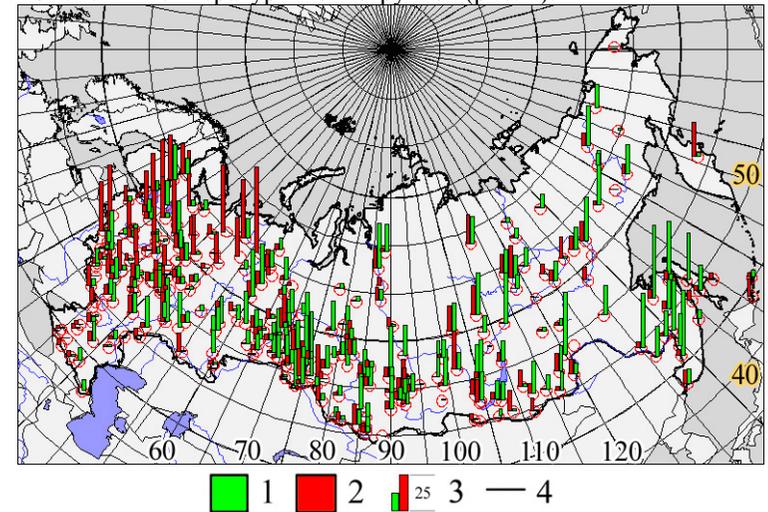


Рис. 4. Вклад (в %) среднегодовой температуры воздуха и высоты снежного покрова в дисперсию среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 160 см

- 1 – Вклад (в %) высоты снежного покрова в многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов,
- 2 – Вклад (в %) среднегодовой температуры воздуха в многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов,
- 3 – масштаб 25% вклада исследуемого фактора, 4 – граница России.

Количественные оценки по уравнению регрессии показали:

а) многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов на Восточно - Европейской равнине определяются в большей мере изменениями температуры воздуха (от 20 до 50%), чем изменениями высоты снежного покрова (от 0 до 10 %). Отепляющее действие снежного покрова здесь ослаблено.

б) в Сибири изменения среднегодовой температуры почвогрунтов определяются в большей мере изменениями высоты снежного покрова (до 50%), чем изменениями температуры воздуха (0 - 5%).

В третьей главе “Температура почвогрунтов в слое 80 – 320 см как показатель термического состояния многолетней мерзлоты в период современных изменений климата” анализируются многолетние изменения температуры почвогрунтов на глубинах 80, 160 и 320 см, проникновение волны

годового хода на глубины, оцениваются термические условия на глубинах для сохранения многолетнемерзлых почвогрунтов.

Многолетние изменения оценивались величинами линейного тренда среднегодовой температуры за 1965 - 2006 гг. в пересчете на 10 лет ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет). На рис. 5. представлено пространственное распределение трендов температуры на глубине 320 см. Анализ трендов показал потепление почвогрунтов на обширной территории, при этом наибольшие тренды ( $0.2 - 0.4^{\circ}\text{C}/10$  лет) повышения среднегодовой температуры на глубине 320 см обнаружены на территории южной половины Сибири. Район наибольшего потепления почвогрунтов частично совпадает с районом наибольшего потепления климата атмосферы, а некоторые пространственные различия связаны с влиянием снежного покрова и с различиями в теплофизических свойствах почвогрунтов.

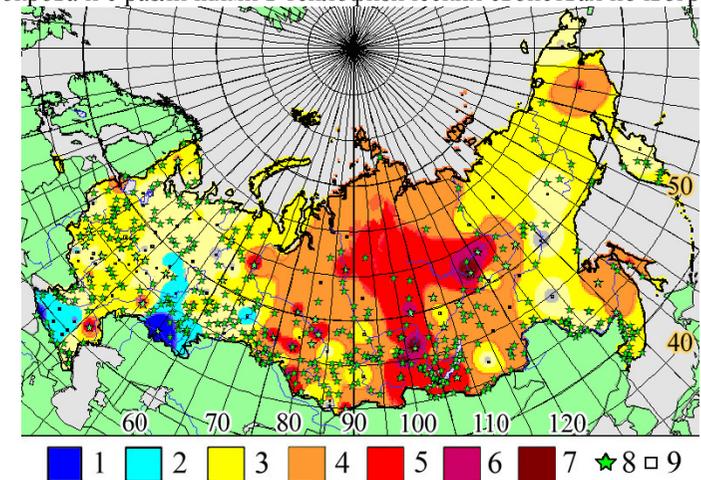


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда ( $^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 320 см за 1965 – 2006 гг.

- 1 –  $-0.3 \leq k < -0.1$ , 2 –  $-0.1 \leq k < 0$ , 3 –  $0 \leq k < 0.1$ , 4 –  $0.1 \leq k < 0.2$ ,  
 5 –  $0.2 \leq k < 0.3$ , 6 –  $0.3 \leq k < 0.4$ , 7 –  $0.4 \leq k < 0.6$ ,  
 8 – станции с достоверностью тренда  $\geq 95\%$ ,  
 9 – станции с незначимым трендом

Во втором разделе главы рассматривается изменение значений максимума и минимума годового хода температуры на различных глубинах за последние три десятилетия. Анализ проводился по семи районам зоны многолетней мерзлоты (рис.6). Районы на территории зоны многолетней мерзлоты выбирались автором с учетом физико-географических и климатических особенностей. Учитывая разреженность станций в северных районах Сибири и Дальнего Востока, выбрано небольшое количество

районов. Европейская часть зоны многолетней мерзлоты естественным образом отделяется Уралом от остальной части - Европейский север РФ (1). Западная Сибирь расположена на равнине, а Восточная на плоскогорье, поэтому область мерзлоты Западной Сибири выделена в отдельный район (2). В западной части Восточной Сибири выделено два района - северо-запад Восточной Сибири (3) и юго-запад Восточной Сибири (6). На территории Якутии лежит центральная часть зоны мерзлоты со своими особенностями – район Якутия (4). За р.Колыма выделен высокоширотный район - север Дальнего Востока (5). В низких широтах на востоке России выделен район, охватывающий Забайкалье - Приамурье (7).

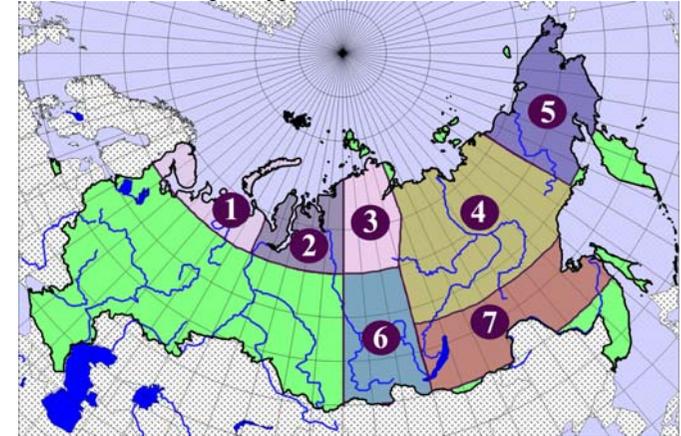


Рис. 6. Районы в зоне мерзлоты: Европейский север РФ (1), север Западной Сибири (2), северо-запад Восточной Сибири (3), Якутия (4), север Дальнего Востока (5), юго-запад Восточной Сибири (6), Забайкалье и Приамурье (7).

Экстремумы годового хода определялись по среднему годовому ходу за пятилетие, осредненному по всем станциям района. Известно, что пространственное распределение станций в России не равномерно, но в пределах каждого выделенного района их распределение можно принять равномерным, поэтому все расчетные значения по району получены осреднением постанционных данных района с равными весами.

По ежедневным данным о температуре почвогрунтов были вычислены на каждый день года средние значения температуры за пятилетие 1977 – 1981 гг. и отдельно за 2001 – 2005 гг. на глубинах 80, 160, 240 и 320 см. Два пятилетия выбраны для сравнения. Среднесуточные значения описывают годовой ход температуры в районе отдельно по двум выборкам лет на каждой глубине. Такие осреднения по станциям района и по пятилетним выборкам позволили получить в каждой выборке гладкий годовой ход температуры для четкого выделения экстремумов. А сравнение годового хода по двум выборкам

позволило получить оценки изменений экстремумов годового хода температуры почвогрунтов за последние три десятилетия.

По полученным осредненным значениям определены минимум и максимум годового хода среднесуточной температуры на каждой глубине отдельно по каждой выборке. Вычислены также среднегодовые значения температуры почвогрунтов на глубинах.

Волны годового хода температуры часто проникают ниже уровня наблюдений 320 см. Экстраполяция полученных значений годовых экстремумов на глубины ниже 320 см дает некоторое представление о проникновении волны годового хода температуры ниже уровня наблюдений. Экстраполяционные значения изменений по вертикали годовых максимума и минимума вычислялись по уравнениям логарифмической аппроксимации с помощью программы Microsoft Excel.

Далее в работе рассматриваются особенности экстремумов годового хода температуры почвогрунтов по районам. В качестве примера, на рис.7 показаны значения минимумов и максимумов годового хода температуры на разных глубинах в Якутии.

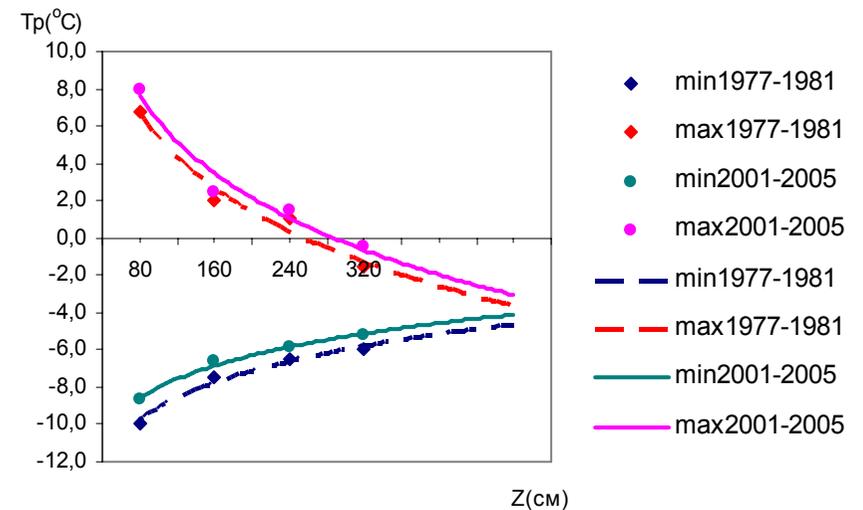


Рис. 7. Изменение по глубине (Z) годового максимума и минимума температуры почвогрунтов по средним данным за 1977 - 1981 и 2001 - 2005 годы. Якутия.

Аппроксимация логарифмической функцией изменений экстремумов температуры и их экстраполяция по глубине показывает, что в Якутии в обеих выборках лет волны годового хода затухали в области отрицательных температур на глубинах более 320 см. Среднегодовые значения на всех глубинах отрицательные (табл.1).

Таблица 1.

Минимальное и максимальное значение среднего годового хода суточной температуры почвогрунтов на глубинах и среднегодовое ее значение (°С) по двум выборкам лет. Якутия

Глубина (см)	1977 – 1981 гг.			Глубина (см)	2001 – 2005 гг.		
	Min	Max	Среднее		Min	Max	Среднее
80	-9.9	6.8	-2.1	80	-8.7	8.0	-1.1
160	-7.5	2.0	-2.3	160	-6.6	2.5	-1.3
240	-6.5	1.0	-2.3	240	-5.9	1.5	-1.5
320	-6.0	-1.5	-2.5	320	-5.2	-0.5	-1.5

Таким образом показано, что в Якутии за три десятилетия произошло повышение минимальных и максимальных за год значений температуры на всех глубинах, повысились и среднегодовые значения на всех глубинах примерно на 1°С, однако среднегодовые значения температуры были и остались отрицательными на глубинах от 80 до 320 см (табл.1). Это означает, что в Якутии условия для устойчивой многолетней мерзлоты сохраняются.

Аппроксимация логарифмической функцией изменений по глубине годового максимума температуры также позволяет определить глубину сезонного протаивания (переход аппроксимирующей линии максимума годового хода через нуль температуры). В Якутии летом протаивание достигало глубины примерно 240 см в 1977 – 1981 гг., а в последние годы оно достигает 280 см.

Во всех районах РФ, относящихся к зоне многолетней мерзлоты, за последние три десятилетия произошло повышение среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 320 см (рис. 8). Устойчивое состояние многолетней мерзлоты с отрицательной среднегодовой температурой на глубине 320 см наблюдалось в 1977 – 1981 гг. и сохранилось после потепления на севере Западной и северо-западе Восточной Сибири, в Якутии и на севере Дальнего Востока. В этих же четырех районах показано увеличение глубины сезонного протаивания за последние три десятилетия. Более подробно изменения глубины протаивания и связанные с ним возможные последствия рассмотрены в главе 4.

Представленные результаты показывают, что благоприятные условия для сохранения многолетнемерзлых почвогрунтов в слое до 320 см в настоящее время сохранились в четырех из рассмотренных семи районов на территории зоны многолетней мерзлоты России.

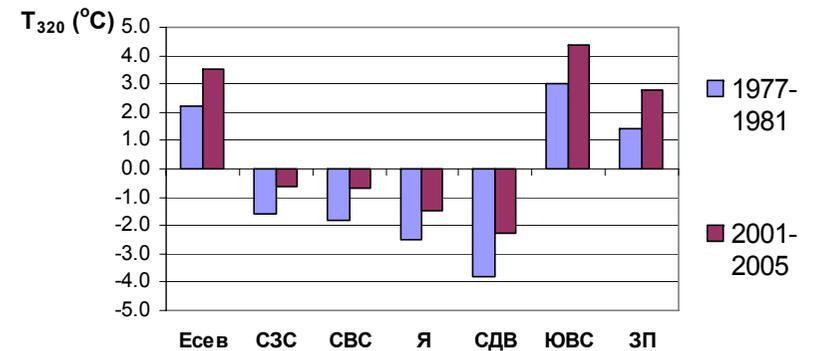


Рис. 8. Среднегодовая температура ( $T_{320}$ ) на глубине 320 см по районам (Есев – Европейский север РФ, СЗС – север Западной Сибири, СВС – северо-запад Восточной Сибири, Я – Якутия, СДВ – север Дальнего Востока, ЮВС – юго-запад Восточной Сибири, ЗП – Забайкалье и Приамурье) по двум интервалам лет: 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг.

Анализ по районам дает обобщенные представления о границах многолетнемерзлых пород, более детальный пространственный анализ положения изотермы, характерной для границы многолетней мерзлоты, изложен в последнем разделе третьей главы. По данным за период 1976 - 2006 год на глубине 320 см по каждой станции построено уравнение линейного тренда среднегодовой температуры почвогрунтов, а затем по уравнению тренда вычислены значения температуры почвогрунтов в 1976 и 2006 годах на глубине 320 см. Вычисленные значения в сглаженном виде отражают температурные условия на 1976 и отдельно на 2006 годы (рис. 9) на каждой станции и дают возможность сравнения изменений за 30 лет.

На карте выделена изотерма  $+3^{\circ}\text{C}$  на 2006 год (черный цвет) и нанесена изотерма  $+3^{\circ}\text{C}$  вычисленная аналогично на 1976 год (зеленый цвет) для сравнения.

Изотерма  $+3^{\circ}\text{C}$  рассмотрена не случайно. В области малых положительных среднегодовых значений температуры почвогрунтов происходит постепенная деградация мерзлоты, но этот процесс идет медленно и занимает десятилетия. Со временем понижается высота кровли мерзлоты, местами мерзлота становится прерывистой или островной. Тем не менее, до тех пор, пока не произошло полное исчезновение круглогодичных мерзлых пород эти районы относят к зоне многолетней мерзлоты.

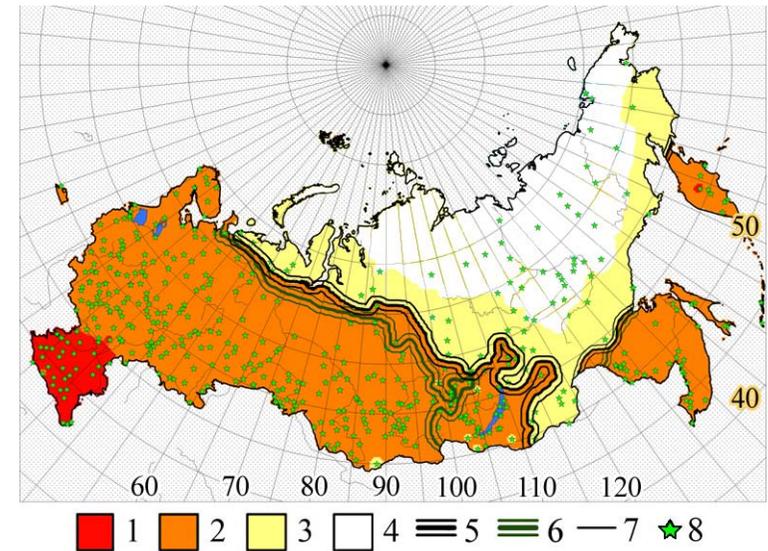


Рис. 9. Пространственное распределение среднегодовых температур почвогрунтов (t) на глубине 320 см в России на 2006 год и изотерма +3°C в 1976 г.

1 –  $10 \leq t < 15$ ,      2 –  $3 < t < 10$ ,      3 –  $0 < t \leq 3$ ,      4 –  $t \leq 0$ ,  
 5 – изотерма +3°C в 2006 г. с доверительным интервалом,  
 6 – изотерма +3°C в 1976 г. с доверительным интервалом,  
 7 – граница России,      8 – метеостанции

Согласно работам геокриологов (В.А. Кудрявцев и др.) зона распространения мерзлоты, включая области прерывистой и островной мерзлоты, в настоящее время определяется среднегодовыми температурами пород +3°C и ниже.

Хорошее согласование положения полученной автором изотермы +3°C для 1976 года с границей криолитозоны тех лет позволяет использовать аналогичную изотерму 2006 года для косвенного анализа положения границы криолитозоны в 2006 году. При этом учитывается, что температура почвогрунтов в определенных грациях является условием необходимым, но недостаточным для того, чтобы делать окончательные выводы относительно изменения границ многолетней мерзлоты.

Из рисунка видно, что наибольшее смещение характерной изотермы к северу произошло в Прибайкалье – Забайкалье и составило около 500 км от южной границы России. На Западно-Сибирской равнине и на юго-западе Среднесибирского плоскогорья смещение изотермы к северу составило до 200 - 300 км. Достоверными являются различия при смещении более 100 км. В

районах смещения изотерм происходят медленные процессы таяния мерзлых почвогрунтов и понижения кровли мерзлоты. При этом наиболее вероятно постепенная деградация многолетней мерзлоты.

Величина приведенных оценок согласуется с прогностическими расчетами М.К. Гаврилова, где на примере Центральной Якутии предполагалось, что повышение температуры воздуха на  $2^{\circ}\text{C}$  приведет к смещению южной границы многолетней мерзлоты на север на  $5^{\circ}$  широты, что составляет более 500 км. Современное повышение среднегодовой температуры воздуха (глава 1) в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке за период с 1976 по 2006 гг. составило чуть меньше от  $0.4$  до  $0.6^{\circ}\text{C}/10$  лет, т.е. за 30 лет температура воздуха повысилась от  $1.2$  до  $1.8^{\circ}\text{C}$ , а величина смещения оказалась в пределах 500 км.

**В четвертой главе “Последствия изменений климата для фундаментов зданий и технических сооружений в зоне многолетней мерзлоты”** рассматриваются климатообусловленные изменения глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов, как важнейшей характеристики устойчивости фундаментов зданий и сооружений, построенных на мерзлоте.

Сезонное протаивание почвогрунтов происходит в теплый сезон года. Учитывая запаздывание по глубинам наступления максимума годового хода температуры почвогрунтов, в качестве теплого сезона на каждой глубине определялись три самых теплых месяца. Теплые месяцы на каждой анализируемой глубине определялась по значениям многолетнего среднего годового хода температуры. По ежегодным данным о средней температуре теплых месяцев за период с 1965 по 2005 год выполнен анализ трендов температуры почвогрунтов на глубинах 80, 160 и 320 см. Показано, что в теплые месяцы года, в зоне мерзлоты России, многолетние тренды температуры почвогрунтов на глубинах 80 – 320 см преимущественно положительные и статистически достоверные. Наибольшее потепление почвогрунтов в теплый сезон наблюдается в Сибири и составляет ( $0.4 - 0.6^{\circ}\text{C}/10$  лет). На глубине 80 и 160 см тренды температуры почвогрунтов  $0.5 - 0.6^{\circ}\text{C}/10$  лет встречаются на станциях в южной половине Сибири и в средней Сибири, а на глубине 320 см (рис.10) тренды с большими значениями ( $0.5 - 0.6^{\circ}\text{C}/10$  лет) встречаются только на станциях южной части Восточной Сибири, в районе Ангары, Прибайкалья и Забайкалья. Достоверность потепления почвогрунтов не менее 95%.

Таким образом, в начале главы 4 показано многолетнее потепление почвогрунтов в теплый сезон и наличие благоприятных условий для увеличения глубины сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты, обобщенно показанного в третьей главе в четырех районах Сибири. Более подробные исследования глубины сезонного протаивания описаны в продолжении главы 4 по отдельным населенным пунктам Сибири, которые наиболее уязвимы с точки зрения увеличения протаивания.

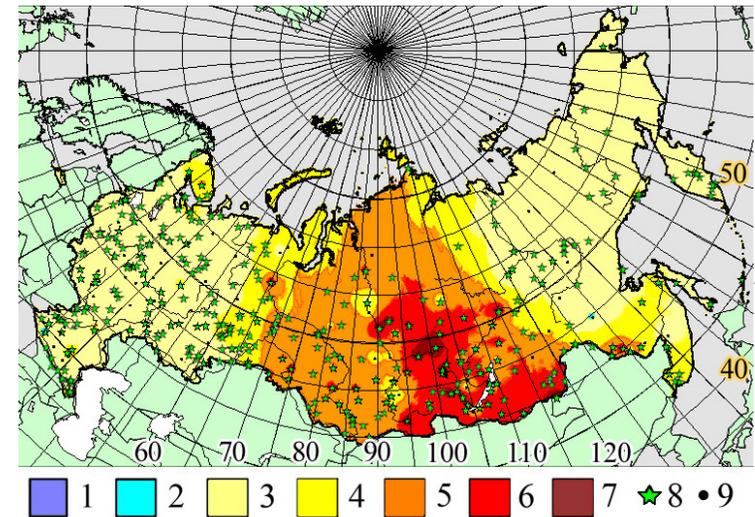


Рис. 10. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда температуры почвогрунтов ( $^{\circ}\text{C}$  за 10 лет) за период 1965 – 2005 гг. на глубине 320 см. Теплый сезон

1 –  $-0.2 \leq k < -0.1$ , 2 –  $-0.1 \leq k < 0$ , 3 –  $0 < k \leq 0.1$ , 4 –  $0.1 < k \leq 0.3$ ,  
 5 –  $0.3 < k \leq 0.4$ , 6 –  $0.4 < k \leq 0.5$ , 7 –  $0.5 < k \leq 0.6$ ,  
 8 – станции с достоверностью тренда  $\geq 95\%$ ,  
 9 – станции с незначимым трендом

В качестве примера, показательными являются изменения глубины сезонного протаивания в Норильске и в Жиганске. На каждой глубине значения максимума определялись по осредненному за пятилетие годовому ходу температуры почвогрунтов с суточной дискретизацией. Максимумы определены отдельно по данным за 1977 - 1981 гг. и за 2001 - 2005 гг. Значения максимумов точками показаны на рис.11. Применение логарифмической аппроксимации для описания изменений по вертикали максимумов годового хода температуры почвогрунтов позволяет определить глубину, на которой максимум годового хода температуры почвогрунтов от положительных значений переходит к нулевому значению и далее к отрицательным значениям. Глубина с нулевым значением максимума годового хода температуры почвогрунтов является глубиной сезонного протаивания. Сравнение кривых аппроксимации максимумов на рис.11 для двух выборок лет позволяет определить многолетнее изменение глубины сезонного протаивания почвогрунтов.

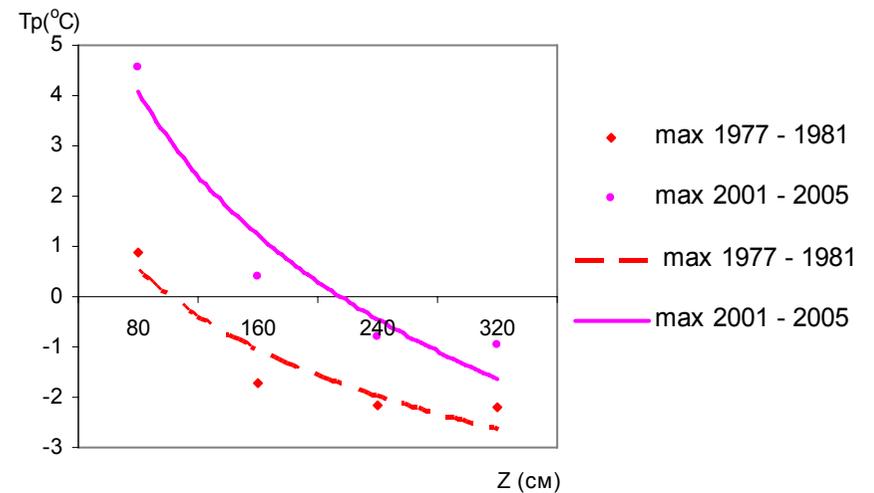


Рис. 11. Сезонное протаивание почвогрунтов. Максимальные (max) значения в годовом ходе температуры на глубинах (Z) по средним данным по двум выборкам лет: 1977 – 1981 и 2001 – 2005 годы. Норильск.

В Норильске (рис.11) глубина сезонного протаивания увеличилась к 2001 – 2005 гг. по сравнению с периодом 1977 – 1981 гг. примерно на 1 м, что способствует увеличению числа случаев просадок фундаментов. Увеличение количества зданий в Норильске, получивших различного рода повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов за рассматриваемый период, отмечено в работах О.А. Анисимова и Л.Н.Хрусталева.

В Жиганске (график не приводится) глубина сезонного протаивания также увеличилась примерно на 1 м, и в настоящее время достигает оснований фундаментов тех зданий и сооружений, которые были построены в конце 60х и начале 70х годов.

На отдельных станциях в температуре грунтов на глубине 320 см в последнее пятилетие обнаружены изменения другого знака. Так в окрестностях Якутска максимальные значения годового хода уменьшились, т.е. глубина сезонного протаивания несколько уменьшилась, при том, что в среднем по Якутии максимальные значения годового хода увеличились. Несмотря на отмеченные особенности отдельных станций, тем не менее, общей тенденцией на огромной территории в четырех крупных районах, является многолетнее увеличение глубины сезонного протаивания.

Таким образом, прочность, заложенная в основания сооружений, построенных 30 - 40 лет назад, по СНиП того периода времени (СНиП II-Б. 6 - 66 и позже СНиП II-18-76), не соответствует современному состоянию климата и современным глубинам сезонного протаивания в зоне многолетней

мерзлоты. Необходимая теперь глубина фундаментов зданий и сооружений существенно увеличилась, в связи с увеличением сезонного протаивания.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что последствиями современных изменений климата является общая тенденция увеличения глубины сезонного протаивания почвогрунтов на огромной территории в четырех крупных районах России. Климатообусловленное увеличение глубины протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов создало несоответствие глубины заложения ранее фундаментов в основаниях зданий и сооружений, построенных по СНиП и климату прошлых лет.

Сложившаяся многолетняя тенденция изменений климата предъявляет новые требования к правилам применения СНиП. В условиях меняющегося климата уже недостаточно данных из климатических справочников прошлых лет о глубине протаивания почвогрунтов.

### **Заключение и выводы**

В ходе проведенной работы получены следующие результаты:

1. За последние четыре десятилетия в зоне многолетней мерзлоты России на глубинах до 320 см произошло повышение температуры почвогрунтов на  $0.8 \div 1.6^{\circ}\text{C}$  (т.е. на  $0.2 \div 0.4^{\circ}\text{C}/10$  лет).

2. Многолетние изменения температуры воздуха определяют изменения среднегодовой температуры почвогрунтов на 20 - 50% на Европейской территории России и на 5% в Сибири. Изменения высоты снежного покрова определяют изменения среднегодовой температуры почвогрунтов на 5 - 10% на Европейской территории России и до 50% в Сибири.

3. Повышение температуры почвогрунтов за период 1976 – 2006 гг. привело в Прибайкалье – Забайкалье на глубине 320 см к смещению на  $500 \pm 50$  км к северу критериальной изотермы в почвогрунтах, характеризующей границы островной мерзлоты.

4. Наблюдается общая многолетняя тенденция климатообусловленного увеличения глубины сезонного протаивания почвогрунтов на обширной территории в четырех крупных районах многолетней мерзлоты России: север Западной и Восточной Сибири, север Дальнего Востока и Якутия. Этот процесс приводит к снижению устойчивости инженерных сооружений, прежде всего за счет несоответствия глубины закладки различных типов фундаментов, построенных или проектируемых по нормам старых СНиП (1966 г., 1976 г.) без учета современных и будущих изменений климата.

#### *Список работ, опубликованных по теме диссертации:*

1. Шерстюков А.Б., Анохин Ю.А. Пространственные особенности изменения температуры воздуха и почвы в зоне многолетней мерзлоты России // Материалы Второй Всероссийской конференции “Научные аспекты экологических проблем России”, М., 2006, с. 22 - 23.

2. Шерстюков А.Б. Температурный режим в зоне многолетней мерзлоты России в последние десятилетия // Материалы Второй конференции молодых ученых национальных гидрометслужб государств - участников СНГ "Новые методы и технологии в гидрометеорологии", М., Росгидромет, 2006, с. 23 - 24.
3. Шерстюков А.Б. Формирование температуры почвогрунтов на глубинах под влиянием температуры воздуха и высоты снежного покрова на территории России // Труды Международной конференции "Криогенные ресурсы полярных регионов", том 1, ОНТИ Пушинского научного центра, 2007, с.186 - 189.
4. Израэль Ю.А., Анохин Ю.А., Мяч Л.Т., Шерстюков А.Б. Оценка и прогноз возможного изменения климата и состояния вечной мерзлоты на территории Российской Федерации в 21 веке // Труды Международной конференции "Криогенные ресурсы полярных регионов", том 1, ОНТИ Пушинского научного центра, 2007, с. 127 - 130.
5. Sherstyukov A.B, Sherstyukov B.G., Groisman P.Ya. Impact of Surface Air Temperature and Snow Cover Depth on the Upper Soil Temperature Variations in Russia // Fall Meeting Supplement, American Geophysical Union, 2007, abstract GC23A-0972
6. Шерстюков А. Б. Динамика проникновения глобального потепления в почвогрунты в зоне многолетней мерзлоты России // Труды Калужского государственного педагогического университета имени К.Э. Циолковского, Серия: Естественные науки, Калуга, Издательство КГПУ имени К.Э. Циолковского, 2007, с. 271 - 275.
7. Шерстюков А. Б. Многолетняя мерзлота России в условиях глобального потепления климата // Проблемы региональной экологии, № 4, 2007, с. 8 – 11. **(Издание рекомендуемое ВАК)**
8. Шерстюков А. Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли, 2008, т. XII, №1, с.78 – 86. **(Издание рекомендуемое ВАК)**
9. Шерстюков А. Б. Температура почвогрунтов России на глубинах до 320 см в условиях изменяющегося климата. // Труды ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», вып.173, 2007, с.72 - 88.
10. Шерстюков А. Б. Критериальные оценки климатических условий существования многолетнемерзлых грунтов в России за период с 1976 по 2005 год по данным наблюдений на глубине 320 см. // Труды ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», вып.173, 2007, с.89 - 95.
11. Израэль Ю.А., Анохин Ю.А., Шерстюков А.Б., Мяч Л.Т., Колесниченко Р.А. Динамико-статистический подход к прогнозированию термического режима многолетнемерзлых пород на территории России // Материалы Международной конференции "Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения", Тюмень, Научный совет по криологии Земли РАН, 2008, с. 235 - 236.