

А. Б. Шерстюков

Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России

ГУ «ВНИИГМИ-МЦД»
Обнинск 2009

УДК 551.583:551.345

Шерстюков А.Б.

Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. – С. 127.

В монографии собраны авторские исследования данных о температуре воздуха, атмосферных осадков и высоты снежного покрова в зоне многолетней мерзлоты и вблизи ее границ. Выявлены региональные особенности изменений климата, получены количественные оценки их влияния на температуру почвогрунтов до глубины 320 см и изучены тренды изменения термического состояния многолетнемерзлых пород за последние 40 лет. Приведены карты трендов температуры почвогрунтов и смещения границы многолетней мерзлоты к северу за 30 лет. Рассмотрены изменения условий устойчивости инженерных сооружений на мерзлоте, изменения потенциальной горимости леса и биоклиматических характеристик в южной части Сибири и Дальнего Востока за тот же период. Выделены позитивные и негативные последствия.

Книга может быть полезной метеорологам, климатологам, географам, экологам, работникам различных отраслей экономики и широкому кругу читателей.

Рецензенты:

доктор географических наук, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, заслуженный деятель науки РТ профессор Ю.П. Переведенцев; доктор географических наук профессор В.А. Семенов.

Содержание

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА, МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ	8
1.1. Проявления некоторых региональных последствий измене- ния климата	8
1.2. Население, инфраструктура, хозяйственная деятельность в южных районах распространения многолетней мерзлоты ...	11
1.3. Исходные данные о температуре почвогрунтов на глуби- нах 80 – 320 см	12
1.4. Представление результатов	15
1.5. Изменения современного климата, важные при оценке по- следствий для состояния мерзлоты	17
Выводы	26
ГЛАВА 2. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВОГРУНТОВ ОТ НАЗЕМНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ	28
2.1. Многолетнемерзлые почвогрунты России	28
2.2. Оценки границ зоны многолетнемерзлых почвогрунтов по климатическому индексу на основе данных о температуре воздуха	32
2.3. Запаздывание годового хода температуры почвогрунтов на глубинах 80 – 320 см по мере их увеличения	34
2.4. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России	37
2.5. Количественные оценки вклада изменений температуры воздуха и высоты снежного покрова в изменения темпера- туры почвогрунтов	44
Выводы	50
ГЛАВА 3. ТЕМПЕРАТУРА ПОЧВОГРУНТОВ В СЛОЕ 80 – 320 СМ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА	52
3.1. Тенденции изменения среднегодовой температуры поч- вогрунтов на глубинах в последние десятилетия	52
3.2. Изменение максимума и минимума годового хода темпера- туры на глубинах за последние три десятилетия	55
3.3. Границы многолетней мерзлоты России в XX веке	66
3.4. Пространственные изменения температуры почвогрунтов вблизи границы зоны многолетней мерзлоты по критериаль- ным оценкам с перспективой на ближайшее десятилетие	68
Выводы	74

ГЛАВА 4. ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В ЗОНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ	75
4.1. Устойчивость зданий и сооружений, построенных на многолетней мерзлоте в меняющемся климате	75
4.2. Тепловые воздействия сооружений на многолетнемерзлые почвогрунты, устойчивость сооружений	77
4.3. Изменение глубины протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов как характеристика возможной неустойчивости фундаментов зданий и сооружений	78
4.4. Использование современных данных о глубине протаивания при закладке фундаментов технических сооружений в зоне многолетней мерзлоты	85
4.5. Изменение глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов в районах некоторых трубопроводов	86
Выводы	88
ГЛАВА 5. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГОРИМОСТИ ЛЕСОВ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА	89
5.1. Изменения климата и лесные пожары	89
5.2. Пожароопасность лесов и метод ее оценки по метеорологическим данным	93
5.3. Изменение горимости леса за последние три десятилетия на территории России	98
Выводы	102
ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА РЕКРЕАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ЮГА ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ	103
6.1. Основные показатели климатической комфортности	103
6.2. Изменения показателей суровости и комфортности погоды зимнего периода	108
6.3. Изменения показателей комфортности погоды летнего периода	112
Выводы	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	117

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ГИС – Геоинформационная система

ЕТР – Европейская территория России

МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата

ММП – многолетнемерзлые породы

СНиП – Строительные нормы и правила

ВВЕДЕНИЕ

Изменения глобального климата привели на территории России к заметным последствиям в жизнедеятельности человека. В последние десятилетия происходит вынужденная его адаптация к новым условиям среды обитания. Региональные различия видов хозяйственной деятельности, специализаций промышленности в регионе, а также неравномерность плотности населения приводят к различным региональным последствиям при изменении климата.

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 между собой, 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 настоящей работе описаны результаты исследований, выполненных с использованием всех существующих данных наблюдений за температурой почвогрунтов по станциям Росгидромета.

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 климата 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 насе-

ления живет в южных районах, последствия изменений климата для человека там могут оказаться наиболее существенными. Перечисленные факторы повышают значимость подобных исследований в зоне многолетней мерзлоты и особенно на юге 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 ближайшее время. 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.

В Сибири сосредоточен основной лесной фонд России, подверженный пожарам при длительной жаркой и сухой погоде. Лесные пожары вблизи населенных пунктов и промышленных объектов создают прямую опасность для человека и его хозяйственной деятельности, кроме того, они уничтожают в лесу флору и фауну и разрушают почву. В процессе горения лесов в атмосферу выбрасывается дополнительное количество углекислого газа, который усиливает его глобальную концентрацию и способствует усилению парникового эффекта и потеплению климата. Кроме того, в зоне мерзлоты последствия лесных пожаров могут приводить к увеличению протаивания мерзлых почвогрунтов, оказывать влияние на температуру более глубоких слоев почвогрунтов, приводить к заболачиванию территории и другим негативным последствиям.

Континентальный климат с суровыми зимними условиями и с быстрой сменой сезонов во многих случаях является лимитирующим фактором в климатозависимых отраслях экономики, а также нередко сдерживает развитие туризма, несмотря на уникальные рекреационные ресурсы и природу, которая в зоне распространения многолетней мерзлоты преимущественно осталась не загрязненной хозяйственной деятельностью человека. Эта территория пока слабо используется в туризме, в том числе и из-за значительной удаленности и недостаточного развития транспорта.

Не самый комфортный, но стабильный климат благоприятствовал бы оптимальному использованию климатических ресурсов, а современные изменения климата создают большие трудности и требуют дополнительных материальных затрат для поддержания и развития жизнедеятельности в населенных регионах Сибири и Дальнего Востока.

ГЛАВА 1. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА, МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ

1.1. Проявления некоторых региональных последствий изменения климата

Климат XX – XXI вв. характеризуется повышением температуры воздуха у поверхности земли как в среднем для земного шара и обоих полушарий, так и для большинства крупных регионов суши и поверхности океана [41, 129]. С конца XX века на основе анализа данных инструментальных наблюдений стало ясно, что изменение глобального климата происходит весьма интенсивно [41, 47, 127, 129]. В этот период времени наблюдается активизация исследований антропогенного влияния на климат [8, 9, 16, 38, 48, 76].

Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) современное глобальное потепление признано беспрецедентным за последние 1000 лет: средняя годовая глобальная температура приземного воздуха увеличилась за 1906 – 2005 гг. на $0,74^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C}$ [129, 137].

Однако во времени глобальное потепление оказалось неоднородным [78, 96]. Выделяются три интервала: потепление 1910 – 1945 гг., слабое похолодание 1946 – 1975 гг. и наиболее интенсивное потепление примерно с 1976 года. В докладе МГЭИК [52, 127] делается вывод о преимущественно антропогенном характере потепления климата последних трех десятилетий, связанном с ростом концентрации CO_2 , метана и других парниковых газов в атмосфере [127].

Глобальное изменение климата сопровождается изменениями климата России [8]. Интенсивность потепления за 100-летие (1901 – 2000 гг.) составила в среднем для территории России $0,90^{\circ}\text{C}/100$ лет. По данным [41], максимум потепления в XX веке в России отмечен в 1995 году (отклонение от нормы – $1,9^{\circ}\text{C}$). По последним данным, 2007 год в России оказался самым теплым за всю историю наблюдений [21]. Аномалия среднегодовой температуры воздуха, осредненной по территории России, в 2007 году составила $2,0^{\circ}\text{C}$. Во второй половине XX века (1951 – 2000 гг.) общая тенденция изменения средней годовой температуры воздуха на территории России также характеризуется положительным трендом. Наиболее интенсивный тренд в Предбайкалье–Забайкалье ($3,5^{\circ}\text{C}/100$ лет), в Приамурье – Приморье и в Средней Сибири. Крупные положительные аномалии температуры сохранялись в этих регионах в течение последних 11 – 12 лет. Для России в целом потепление более заметно зимой и весной (тренд составил, соответственно, $4,7^{\circ}\text{C}/100$ лет и $2,9^{\circ}\text{C}/100$ лет) [41]. Все перечисленные районы потепления климата находятся в зоне

многолетней мерзлоты или вблизи ее южной границы. Существование мерзлоты является следствием давно ушедших климатических условий [26, 98], а изменение современного климата создает новые условия, способные повлиять на состояние многолетних мерзлых грунтов [6, 7, 23, 27, 49, 51, 52, 56]. Еще совсем недавно мерзлота в этой зоне называлась вечной, а в последние годы чаще употребляется термин «многолетняя мерзлота».

Наблюдаемые изменения климата уже сейчас оказывают заметное влияние на среду обитания и хозяйственную деятельность человека. Как уже отмечалось и подробнее будет показано далее, в России наиболее существенные изменения климата произошли на территории распространения многолетней мерзлоты и на юге Сибири. Там следует ожидать наиболее существенных как позитивных, так и негативных последствий изменения климата. Примерами негативных последствий потепления климата на обширной территории многолетней мерзлоты России является деградация многолетней мерзлоты, ослабление фундаментов зданий и сооружений, построенных на мерзлоте, и увеличение количества лесных пожаров на юге Сибири и Дальнего Востока.

Многолетняя мерзлота является продуктом климата и ее состояние зависит от изменяющегося современного климата. Следует отметить, что температура почвогрунтов является элементом климата. Атмосфера и суша находятся в постоянном взаимодействии, поэтому не только изменения климата атмосферы оказывают влияние на температуру почвогрунтов, но и изменения температуры поверхности почвогрунтов оказывают влияние на атмосферу. Однако, если учесть, что изменения климата последних трех-четырех десятилетий в значительной мере имеют парниковое происхождение, то современные изменения температуры почвогрунтов на глубинах в значительной мере можно рассматривать как последствия изменений климата.

Представленное исследование построено на основе анализа результатов наблюдений за температурой почвогрунтов по вытяжным термометрам по всем станциям сети Росгидромета, на которых за последние три и более десятилетий имеются непрерывные наблюдения (критерий полноты данных описан в разделе 1.3).

Изменение состояния почвогрунтов в результате деградации мерзлоты отражается на инженерно-технических сооружениях [42, 103]. Мерзлые почвогрунты определяют специфику инфраструктуры в районах распространения многолетней мерзлоты и техническую специфику построения фундаментов всех зданий и сооружений, включая опоры жизненно важных мостов через сибирские реки, трубопроводы для перекачки нефти и газа.

Фундаменты зданий и опоры технических сооружений ставились в мерзлые породы ниже глубины летнего протаивания в расчете

на их прочность и на вечность мерзлоты. В связи с потеплением климата увеличивается глубина протаивания и возникает вопрос о надежности таких сооружений. Значимость и актуальность вопроса определяется тем, что на территории многолетней мерзлоты или вблизи ее границ сконцентрированы главные объекты добывающей промышленности России: здесь крупнейшие разведанные месторождения нефти и природного газа, крупнейшие месторождения урановых, марганцевых и хромовых руд, здесь добывают олово и золото; здесь проходят крупнейшие газопроводы и нефтепроводы и развивается строительство новых трубопроводов. Долговечность работы указанных объектов будет зависеть не только от их технических характеристик, но и от изменений климата.

Другим следствием деградации мерзлоты является высвобождение газов (особенно метана), замороженных в грунте, и поступление их в атмосферу [87, 138]. Метан является парниковым газом и по его концентрации в воздухе он стоит на втором месте после углекислого газа. Метан в связанном состоянии находится в виде метангидрата и в больших количествах вморожен в почвогрунты в зоне многолетней мерзлоты. Высвобождение метана опасно усилением глобального парникового эффекта и активизацией положительной обратной связи изменений климата.

Холодный климат в зоне мерзлоты создает благоприятные условия для длительного сохранения снежного покрова. Снег влияет на альбедо планеты и в некоторой степени определяет существующий климат. Потепление климата сокращает площадь и продолжительность залегания снежного покрова, в результате этого уменьшается альбедо подстилающей поверхности, что может привести к еще большему потеплению климата. Это второй пример положительной обратной связи.

Анализу современного состояния мерзлоты России было посвящено много работ, например [4, 7, 23, 28, 49, 51, 59, 60, 70, 71, 74, 75, 78, 82, 84, 88, 93, 109, 117]. В развитие перечисленных публикаций в настоящей работе приведены результаты более углубленного анализа состояния многолетнемерзлых почвогрунтов на основе более полной информации по всем станциям сети метеорологических станций России с учетом новых данных, при этом добавлены сведения об изменении температуры почвогрунтов на глубине 320 см.

1.2. Население, инфраструктура, хозяйственная деятельность в южных районах распространения многолетней мерзлоты

Средний показатель заселенности территории с многолетней мерзлотой крайне низок и составляет всего лишь 2,5 человека на 1 кв. км. Более густо заселена южная часть Сибири, где плотность населения достигает 25 – 30 человек на 1 кв. км и проживает около 80% населения [45]. На рассматриваемой территории находятся крупные города – Челябинск, Тюмень, Омск, Томск, Новосибирск, Барнаул, Красноярск, Абакан, Кызыл, Братск, Иркутск, Улан-Удэ, Чита, в которых сосредоточен основной промышленный потенциал Сибири, и в значительной мере всей России.

В зоне мерзлоты или вблизи ее границ находятся основные геологические запасы угля России. Около 70% разведанных (балансовых) запасов нефти России находится в Томской и Тюменской областях [45]. Основные запасы природного газа России (до 80% всех ее разведанных запасов) приходятся на Тюменскую область. В России крупнейшие месторождения урановых руд находятся на юге Читинской области. Запасы марганцевых и хромовых руд сосредоточены в Кемеровской области, Красноярском крае, Тыве, Читинской области). В Читинской области и Красноярском крае добывают полиметаллические руды, олово, золото.

По территории южной Сибири проходят газопроводы из Тюменской области до Новосибирска, Прокопьевска (Кемеровская область). Осуществляется прокладка нового нефтепровода севернее Байкала через участок с многолетнемерзлыми почвогрунтами.

Суровый климат Сибири оказывает существенное влияние на технологические процессы перечисленных районов добычи природных запасов и промышленных регионов, на работу транспорта, а также на устойчивость фундаментов зданий и сооружений, на сохранность трубопроводов в зоне многолетней мерзлоты.

Из публикаций [1, 5, 107] известно много случаев нарушения устойчивости фундаментов зданий и сооружений в зоне мерзлоты из-за инженерных просчетов и неправильной эксплуатации зданий, не учитывающих особых условий в рассматриваемой зоне, поэтому не все проблемы с фундаментами относятся к климатическим последствиям. С учетом этого далее в работе последовательно проводится тщательный анализ по выявлению зависимости изменений температуры почвогрунтов от изменений климата.

1.3. Исходные данные о температуре почвогрунтов на глубинах 80 – 320 см

Исходными данными послужили архивы Всероссийского НИИ гидрометеорологической информации-Мирового центра данных по всей сети гидрометеорологических станций России. Ниже приводится описание данных и этапы их обработки.

Данные об основных показателях состояния климата

Для анализа привлекались данные за последние 30 – 40 лет. Столь ограниченный интервал лет выбран, с одной стороны, стремлением получить статистические оценки за период наибольших изменений климата последних десятилетий, а с другой стороны – отсутствием достаточного количества станций с наблюдениями по вытяжным термометрам за более ранние годы. Анализ данных, входящих в перечень основных метеорологических элементов, выполнялся в настоящей работе по 1612 станциям России (температура воздуха, количество атмосферных осадков). Данные о высоте снежного покрова в архивах имеют пропуски, исторически связанные с технологическими проблемами создания перфокарточного массива в 1970-е годы и последующего их перевода на другие технические носители. Поэтому высота снежного покрова анализировалась по 577 станциям. Анализ изменений климата проводился по среднемесячным значениям температуры воздуха, месячным суммам атмосферных осадков и среднемесячной или средней за сезон со снегом высоте снежного покрова. Среднемесячные значения высоты снежного покрова вычислялись за те месяцы со снегом, в которых снежный покров лежал не менее 20 суток, при этом дни без снега не участвовали в осреднении.

Массив данных о температуре почвогрунтов на глубинах 80 – 320 см

Наибольшее количество трудностей было связано с подготовкой рядов суточных и среднемесячных значений температуры почвы на глубинах 80, 160, 240 и 320 см.

Основная проблема – пропуски в данных. Наблюдения за температурой почвогрунтов на глубинах входят в программу наблюдений не на всех станциях и не являются основными. В наблюдениях, по причинам не всегда известным, возникали перерывы на отдельных глубинах или на всех глубинах одновременно, а в архивах в это время возникали пропуски в данных. На глубине 240 см наблюдения проводятся не на всех станциях. Кроме того, в архивах, созданных в ГУ «ВНИИГМИ-МЦД» на основе перфокартотек до 1976 года, имеются сравнительно большие пропуски в данных о температуре почвогрунтов, так как со времени их создания (1970-е гг.) до ввода в ЭВМ и создания в 1980-х годах на магнитных лентах архивных файлов, перфокартотеки

деградировали из-за старения основы (перфокарт) и хранения в неподходящих условиях. Поэтому при создании современных массивов данных о температуре почвогрунтов на глубинах до 320 см большое количество станций было исключено автором по причине недостатка достоверных непрерывных данных. Были отобраны только те из станций, на которых в течение длительного времени (более 20 лет) не прерывались инструментальные наблюдения за температурой почвогрунтов.

Массивы суточных данных были созданы на основе выборок из архива ежедневных наблюдений на метеорологических станциях за 1977 – 2006 годы с последующим помесечным осреднением. За более ранние годы месячные данные были взяты из архива месячных данных, хранящегося в ГУ «ВНИИГМИ-МЦД».

Геокриологи в своей работе чаще используют данные основных информационных объектов мониторинга зоны многолетней мерзлоты (станции, площадки, полигоны, участки). В России насчитывается 14 таких объектов по данным на 2004 год [88]. Методы наблюдений и качество данных метеорологических станций о температуре почвогрунтов на глубинах, по сравнению с данными геокриологических стационаров, возможно, менее совершенны. Но преимущество данных метеорологических станции в том, что одновременно с измерениями температуры почвогрунтов производится весь комплекс гидрометеорологических наблюдений (температура воздуха, характеристика и динамика снежного покрова и жидких осадков и т. д.), необходимый для расчетов и объяснения закономерностей формирования температуры почвогрунтов (слоя сезонного промерзания – протаивания) и слоя годовых теплооборотов [67]. Еще более явным преимуществом является пространственная густота метеорологических станций. Она в десятки раз превышает густоту геокриологических стационаров. Недостатком данных с метеорологических станций является ограничение глубиной 320 см. Но результаты наблюдений метеорологических станций за температурой почвогрунтов всегда полезны при мелко-масштабном картировании [33]. Работа стационаров проводится различными НИИ и не всегда регулярно. Они ограничены несколькими десятками лет, поэтому сопоставимых с метеорологическими станциями длинных рядов наблюдений на стационарах не существует. Не отрицая погрешностей и недостатков сети Росгидромета, наблюдения на ней за реакцией земной поверхности в области сезонной и многолетней мерзлоты на изменения температуры воздуха на 1/6 части суши являются уникальными в мировом масштабе [20].

При этом количество не только геокриологических стационаров, но и метеорологических станций, выполняющих наблюдения за температурой почвогрунтов на глубинах, недостаточно для равномерного покрытия территории России. Количество метеорологических станций

значительно превосходит число геокриологических стационаров, но тем не менее в северных и северо-восточных регионах России метеорологических станций меньше, чем на остальной территории страны. Поэтому для комплексного и всеобъемлющего наблюдения за состоянием почвогрунтов необходимо развивать как сеть геокриологических стационаров, так и метеорологических станций.

Как указано выше, наблюдения за температурой почвогрунтов по вытяжным термометрам проводятся по ограниченному числу станций, поэтому полная сеть станций с данными о температуре почвогрунтов, участвующих в анализе, значительно меньше, чем сеть для основных метеорологических элементов.

Таким образом, при исследованиях использовались результаты наблюдений по всей сети станций Росгидромета с непрерывными данными о температуре почвогрунтов на глубинах 80 – 320 см по вытяжным термометрам (461 – 612 станций) за период 1965 – 2006 гг.

Количество станций, на которых проводились наблюдения за температурой почвогрунтов на глубинах 80, 160 и 320 см, и полнота данных на них различна. Кроме того, не на каждой станции, проводящей наблюдения за температурой почвогрунтов, были надежные многолетние данные о высоте снежного покрова. Поэтому при анализе корреляционных связей между различными характеристиками климата из всех станций были выбраны только те станции, на которых в архивах имеется необходимая совокупность данных о температуре на глубинах, о высоте снежного покрова и о температуре воздуха с пропусками в синхронных наблюдениях не более 15% случаев. Остальные станции в корреляционном анализе не рассматривались. В результате отбора при совместном анализе со снежным покровом и температурой воздуха использовались данные о температуре почвогрунтов на глубине 80 см – 164 станций, на глубине 160 см – 157 станций, на глубине 320 см – 115 станций.

Для учета запаздывания экстремумов годового хода температуры почвогрунтов на разных глубинах зимний и летний периоды определялись по каждой станции и на каждой глубине отдельно как три самых холодных (далее – зима) и три самых теплых месяца (далее – лето) соответственно. Границы сезонов определялись по средним данным за 1965 – 2006 годы, такое осреднение характеризует их современное климатологическое значение на каждой глубине и на каждой станции. Более детальное изучение пространственных различий в запаздывании годового хода температуры на различных глубинах проводилось по суточным данным на глубинах 80 – 320 см.

Однородность данных о температуре почвогрунтов определялась путем визуального анализа графиков многолетнего хода температуры на глубинах за исследуемый интервал лет. Это позволило ис-

ключить станции с грубыми нарушениями однородности, связанными с переносами станций. Данный подход выявления неоднородностей в данных был выбран ввиду отсутствия истории станций за последние десятилетия в исходных архивах ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». Кроме того, результаты в работе в большинстве случаев описаны не по отдельным станциям, а по обширным территориям. Это, вероятно, позволило избежать ошибочных выводов, если предположить, что отдельные нарушения однородности были недоучтены.

При создании массивов данных использовались результаты наблюдений, прошедшие контроль качества в ходе создания исходных архивов ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», поэтому дополнительный контроль качества не проводился.

1.4. Представление результатов

Большая часть результатов, полученных в работе по сети метеорологических станций, представлена далее в виде карт на географической основе. Карты построены с применением геоинформационной системы (ГИС). Входными данными для ГИС являлись расчетные данные различных показателей климата, значения трендов, аномалий, корреляций.

Наглядность и точность представления пространственного распределения метеорологических величин на поверхности Земли зависит от выбранной проекции. Картографические проекции определяют зависимость между координатами точек на поверхности земного эллипсоида и на плоскости. Самым существенным признаком проекций является свойство изображений. Неизбежным же свойством изображений являются искажения. Из-за невозможности развернуть поверхность эллипсоида (или шара) на плоскости без складок или разрывов на карте неизбежны некоторые искажения геометрических свойств изображаемой поверхности [24]. Различные проекции предназначены для минимизации характера искажений по одному из параметров: длина, угол или площадь. При этом величина искажений зависит еще от размеров и формы изображаемой территории. Выбор проекции должен обеспечивать оптимальное решение для выбранной территории и поставленной задачи. В настоящей работе карты используются как инструмент анализа, обобщения данных и удобной для пользователей формой их представления. В данном случае существенными факторами являются правильная передача относительности географического расположения и очертаний континентов, внутренних морей, крупных озер, рек, вид картографической сетки. Для представления большой территории в средних и высоких широтах, которую занимает Российская Федерация, наиболее наглядной является равноугольная азимутальная стереографическая проекция (па-

раллели – окружности с общим центром, меридианы – пучок прямых, расходящихся радиально из центра параллелей). В этой проекции любой круг, взятый на поверхности сферы, изображается также кругом. Форма и углы сохраняются, площадь передается без искажения в центре проекции, искажения возрастают по мере удаления от центра, масштаб длин также увеличивается по мере удаления от центра.

Благодаря своим свойствам, проекция получила широкое применение на практике (карты Северного и Южного полушарий). В ней хорошо изображать территории, имеющие округлую форму, также эта проекция выгодна для изображения территорий, расположенных в средних широтах и растянутых вдоль параллелей [32].

При построении карт России на основании учета свойств проекций и анализируемой территории в работе использовалась равноугольная азимутальная стереографическая проекция.

На рис. 1.1 на карте Северного полушария выделена территория Российской Федерации с наглядными привычными очертаниями. Поскольку Российской Федерации расположена ближе к центру круга, то искажения минимальны.

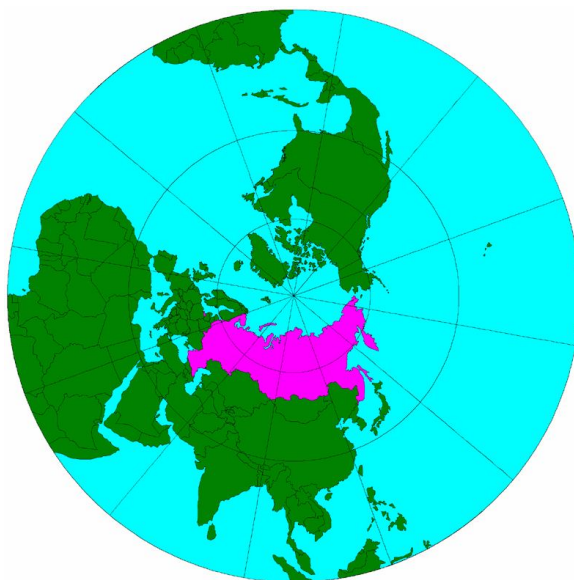


Рис. 1.1. Северное полушарие в равноугольной азимутальной стереографической проекции (выделена территория России)

При построении карт различных характеристик использовался стандартный метод IDW пространственной интерполяции с коэффициентами, обратно пропорциональными квадрату расстояния. Точность работы ГИС зависит от густоты станций и свойств интерполируемого поля. В районах с малой густотой станций теряются некоторые региональные особенности, тем не менее и в этих районах карты позволяют анализировать крупномасштабные пространственные особенности полей рассматриваемых температур в масштабах Россий-

ской Федерации. За исключением высокоширотных районов Сибири и Дальнего Востока, анализируемый набор станций позволяет получить карты с детализацией примерно $5 \times 5^\circ$ географических широты и долготы (в некоторых случаях – $10 \times 10^\circ$).

1.5. Изменения современного климата, важные при оценке последствий для состояния мерзлоты

Изменения температуры воздуха

Как уже было сказано в разделе 1.1, по данным за 1901 – 2000 гг. в работе [41] показано, что интенсивность потепления за столетие составила в среднем для территории России $0,09^\circ\text{C}/10$ лет. Во второй половине XX века (1951 – 2000 гг.) на территории России также преобладает положительный тренд. За этот период наиболее интенсивный тренд наблюдался в Предбайкалье–Забайкалье – $0,35^\circ\text{C}/10$ лет, в Приамурье–Приморье и в средней Сибири [41].

Известно, что глобальное потепление происходило неравномерно за указанное столетие. После интервала потепления в 1910 – 1945 гг. было слабое похолодание в 1946 – 1975 гг., с 1976 года началось новое наиболее интенсивное потепление [41]. Поэтому в публикации [55] оценки трендов сделаны за период 1976 – 2006 гг., несмотря на то, что ряды приводятся начиная с 1951 года.

Автором проводился анализ рядов по данным с 1976 года, оценки трендов (k) температуры воздуха были получены за тот же период. В эти годы было 1612 действующих гидрометеорологических станции с данными наблюдений по России. Это дало возможность выполнить детальный пространственный анализ особенностей изменения климата.

На рис. 1.2 в картографической форме показаны коэффициенты линейных трендов среднегодовой температуры воздуха, точки расположения станций и оценки статистической достоверности трендов.

Видно, что за последние три десятка лет, включающие 6 лет XXI века, на территории России наиболее интенсивное и статистически значимое повышение среднегодовой температуры воздуха произошло главным образом на ЕТР, а также в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. В этих районах потепление составило от $0,4$ до $0,6^\circ\text{C}/10$ лет. В Западной Сибири также наблюдаются положительные тренды, но они меньше $0,4^\circ\text{C}/10$ лет, а статистически значимые тренды среднегодовой температуры отмечены только на юге Западной Сибири. Потепление $0,5$ – $0,6^\circ\text{C}/10$ лет за эти годы также выделяется в Предбайкалье–Забайкалье и в Приамурье.

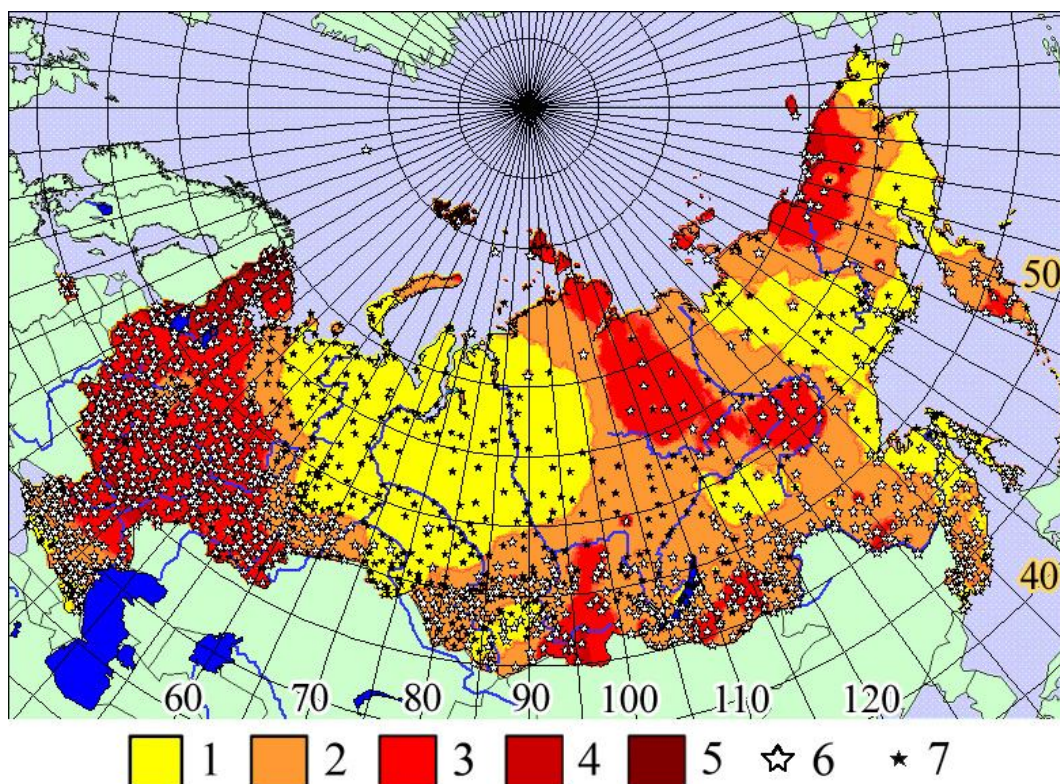


Рис. 1.2. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры воздуха за 1976 – 2006 гг. ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет): 1 – $0,1 \leq k < 0,4$; 2 – $0,4 \leq k < 0,5$; 3 – $0,5 \leq k < 0,6$; 4 – $0,6 \leq k < 0,7$; 5 – $0,7 \leq k < 0,8$; 6 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 7 – станции с незначимым трендом

Карта распределения коэффициентов линейного тренда (рис.1.2) согласуется с аналогичной картой из [99] и детализирует некоторые пространственные особенности трендов.

Оценки статистической достоверности трендов, показанные в точках станций, позволяют более обоснованно делать выводы об изменениях климата последнего тридцатилетия. Такие же преимущества имеют последующие карты распределения коэффициентов линейного тренда температуры по четырем сезонам года, представленные в исследовании.

Зимой наибольшее потепление произошло на ЕТР, в Восточной Сибири и на юге Дальнего Востока (рис. 1.3), при этом станций со статистически значимыми трендами мало.

Большая межгодовая изменчивость температуры зимой часто делает тренды незначимыми на тридцатилетнем интервале. В Приамурье потепление достигает $0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет и при этом тренд статистически достоверен с вероятностью 95% (рис. 1.3). На севере Дальнего Востока произошло статистически достоверное понижение температуры до $-0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет.

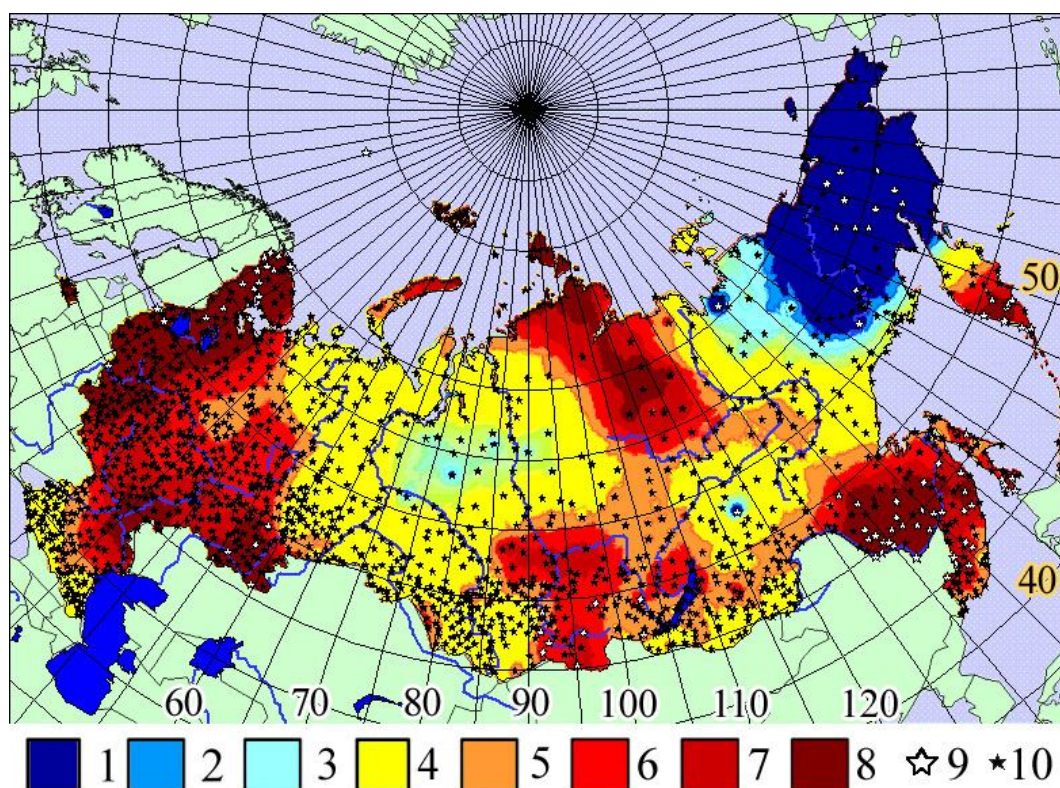


Рис. 1.3. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры воздуха за 1976 – 2006 гг. Зима ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет): 1 – $-0,4 < k \leq -0,3$; 2 – $-0,3 < k \leq -0,2$; 3 – $-0,2 < k \leq -0,1$; 4 – $-0,1 < k \leq 0,4$; 5 – $0,4 \leq k < 0,5$; 6 – $0,5 \leq k < 0,6$; 7 – $0,6 \leq k < 0,7$; 8 – $0,7 \leq k < 0,8$; 9 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 10 – станции с незначимым трендом

На рис. 1.4 видно, что весной потепление охватило Западную Сибирь восточнее Оби и Иртыша. Здесь на обширной территории повышение температуры составило от $0,4$ до $0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет. Такое же повышение температуры воздуха преобладает на большей части Восточной Сибири. Причем на юге Западной Сибири и Восточной Сибири тренды статистически значимые и наиболее интенсивные, достигающие $0,7 - 0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет. На Дальнем Востоке, восточнее Колымы, также отмечено статистически значимое интенсивное потепление температуры воздуха, оно составляет $0,7 - 0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Летом в Сибири зона потепления переместилась на Восточную Сибирь и на Дальний Восток (рис.1.5), тренды потепления там составили $0,4 - 0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет. А в Западной Сибири тренды температуры стали незначимыми. На ЕТР потепление также составило $0,4 - 0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Осенью самое обширное статистически значимое повышение температуры воздуха произошло на Дальнем Востоке и на примыкающей части Восточной Сибири. Второй очаг повышения температуры находится на юге Урала – $0,5 - 0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет и юге ЕТР –

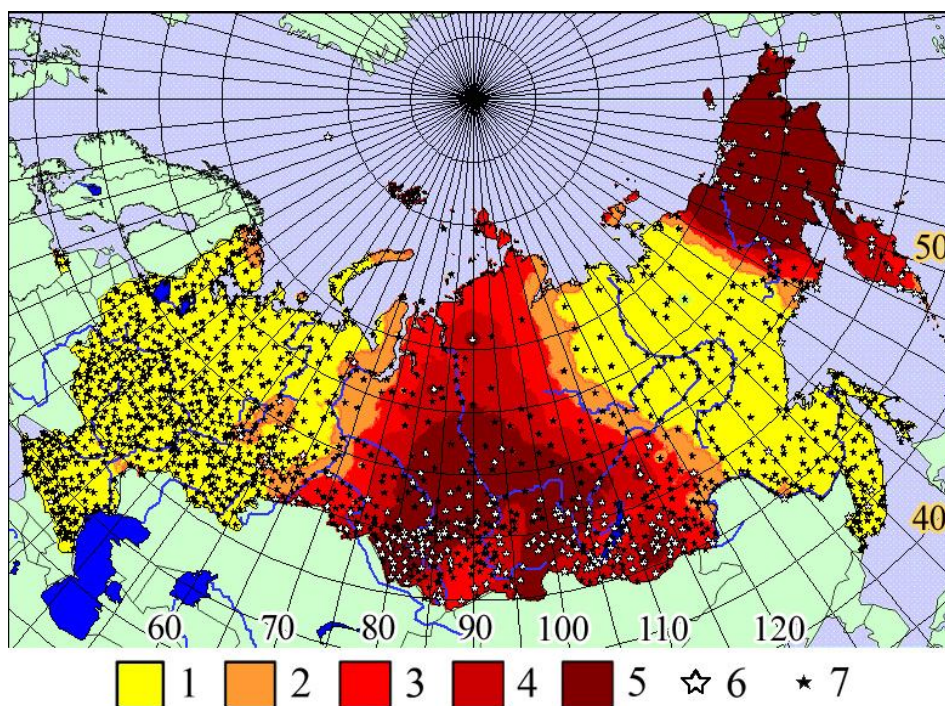


Рис. 1.4. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры воздуха за 1976 – 2006 гг. Весна ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет): 1 – $0,1 \leq k < 0,4$; 2 – $0,4 \leq k < 0,5$; 3 – $0,5 \leq k < 0,6$; 4 – $0,6 \leq k < 0,7$; 5 – $0,7 \leq k < 0,8$; 6 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 7 – станции с незначимым трендом

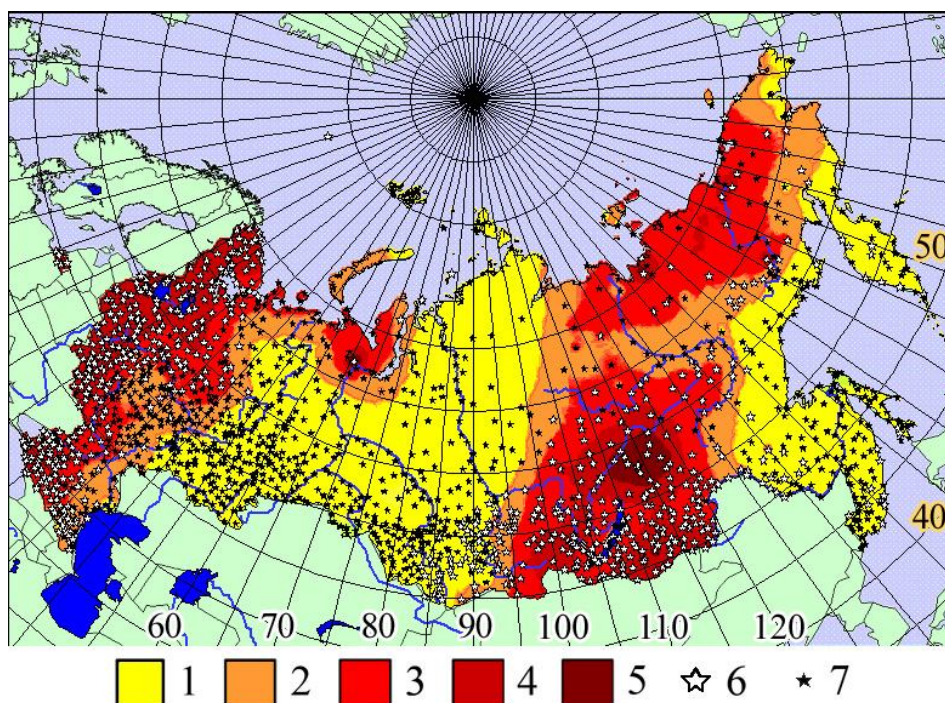


Рис. 1.5. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры воздуха за 1976 – 2006 гг. Лето ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет): 1 – $0,1 \leq k < 0,4$; 2 – $0,4 \leq k < 0,5$; 3 – $0,5 \leq k < 0,6$; 4 – $0,6 \leq k < 0,7$; 5 – $0,7 \leq k < 0,8$; 6 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 7 – станции с незначимым трендом

0,5 – 0,6°C/10 лет (рис.1.6). Достоверное повышение температуры на 0,6 – 0,8°C/10 лет наблюдается в Приамурье, в среднем течении р. Лены, на Колыме, Чукотке и Камчатке. На ЕТР значимые тренды отмечены в Поволжье, на Кавказе и южнее Урала, они составляют 0,6 – 0,8°C/10 лет. На обширной территории Западной и Восточной Сибири статистически значимых трендов не обнаружено.

Таким образом, в Сибири за период 1976 – 2006 гг. подтверждается повышение температуры воздуха, отмеченное ранее в работах Г.В. Груза [39 – 41] и в Докладе Росгидромета [55]. Очаги интенсивного повышения температуры в различных сезонах приходятся на разные районы России, но во все сезоны, кроме осени, в южных районах Сибири вблизи южной границы зоны многолетней мерзлоты наблюдается статистически значимое увеличение температуры воздуха. На Дальнем Востоке зимой наблюдается понижение температуры в его северной половине до -0,4°C/10 лет, а осенью и весной там же – сильное повышение температуры (0,6 – 0,8°C/10 лет). На ЕТР наблюдается рост температуры зимой, летом и в южной ее части осенью 0,6 – 0,8°C/10 лет.

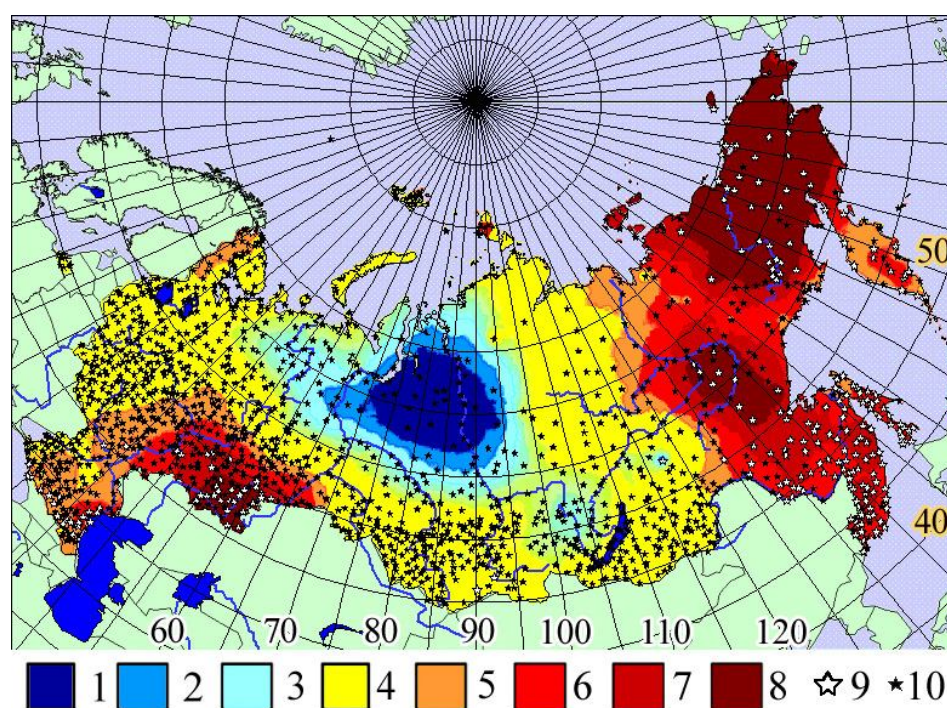


Рис. 1.6. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры воздуха за 1976 – 2006 гг. Осень (°C за 10 лет): 1 – $-0,4 < k \leq -0,3$; 2 – $-0,3 < k \leq -0,2$; 3 – $-0,2 < k \leq -0,1$; 4 – $0,1 \leq k < 0,4$; 5 – $0,4 \leq k < 0,5$; 6 – $0,5 \leq k < 0,6$; 7 – $0,6 \leq k < 0,7$; 8 – $0,7 \leq k < 0,8$; 9 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 10 – станции с незначимым трендом

Изменение количества атмосферных осадков

Атмосферные осадки оказывают существенное влияние на увлажнение почвы в теплое полугодие и на высоту снежного покрова в холодное полугодие, которые в свою очередь в значительной мере определяют интенсивность проникновения волн тепла и холода из атмосферы в почвогрунты на глубины. Однако климатология осадков изучена значительно хуже, чем, например, температуры. Этот вывод приводится в работе [41].

В работе [39] проведено изучение изменения осадков на территории Российской Федерации в XX веке. В частности, приведены оценки тренда сезонных сумм осадков за период 1936 – 2000 гг. в целом и за период с 1970 г. по данным 400 – 500 станций. Для обоих периодов показано, что наибольший рост осадков происходит в зимний сезон над Западной Сибирью (достоверность 99%) и европейской частью Российской Федерации (достоверность 97,5%), а также над Средней Сибирью в целом за 1936 – 2000 гг.

Изменения количества атмосферных осадков за период 1945 – 2000 гг. также рассматривались в работе [94], где показано, что преобладающими и наиболее значимыми являются положительные тенденции осадков от 0,1 до 0,4 мм/год в континентальных районах Северо-Восточной Азии. Также показано увеличение осадков (0,3 – 0,4 мм/год) в поясе умеренных и высоких широт (50 – 70°с.ш.) в месяцы осеннего, зимнего и весеннего сезонов с явным преобладанием в холодный период года, а именно с октября по март.

В данной работе выполнен анализ трендов количества осадков по 1612 станциям по данным за период интенсивного потепления 1976 – 2006 гг.

Из рис. 1.7 следует, что в целом на территории России преобладает увеличение годовых сумм осадков. Исключение составляют мелкие очаги уменьшения годовых сумм осадков от 1 до 20 мм/10 лет в центре ЕТР и на севере Восточной Сибири. Достоверность отрицательных трендов в этих районах составляет 95%. На Чукотке, Камчатке и в Приамурье также наблюдается уменьшение годовых осадков, но значимых трендов в этих районах нет. На остальной территории России наблюдается увеличение годовых осадков от 1 до 20 мм/10 лет. В Приуралье, на юге Западной и Восточной Сибири увеличение годовых сумм

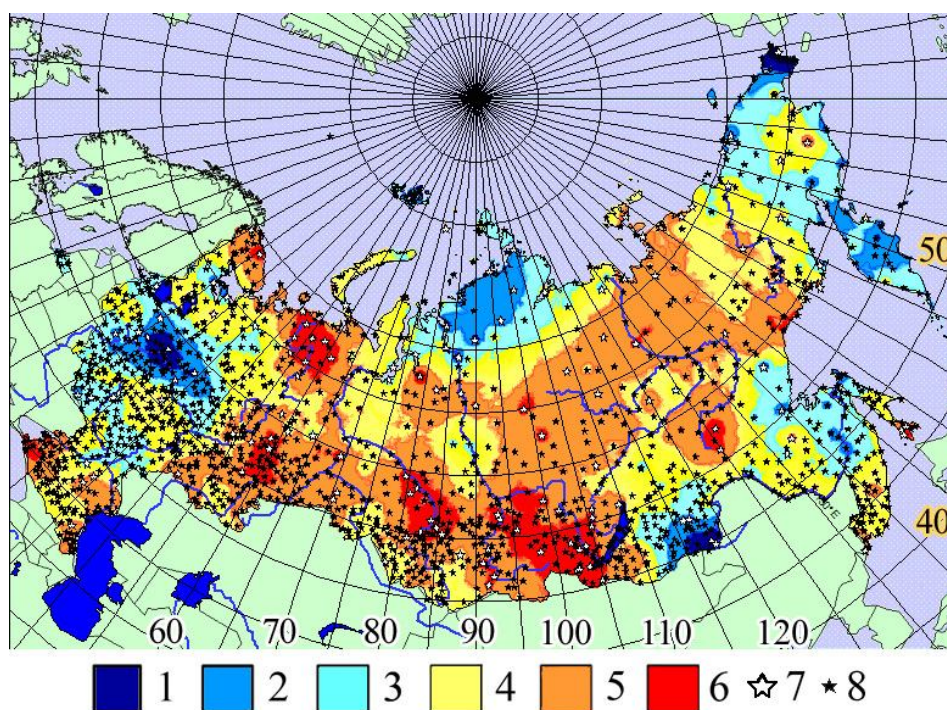


Рис. 1.7. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда годовых сумм осадков в мм/10 лет за период 1976 – 2006 гг.:

1 – $-30 \leq k < -20$; 2 – $-20 \leq k < -10$; 3 – $-10 \leq k < 0$; 4 – $0 \leq k < 10$; 5 – $10 \leq k < 20$;

6 – $20 \leq k < 30$; 7 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$;

8 – станции с незначимым трендом

осадков достигает 10 – 20 и более мм/10 лет. В перечисленных районах, в которых наблюдается наиболее существенное увеличение количества годовых сумм осадков, сосредоточено преобладающее количество станций со статистически значимыми трендами.

Таким образом, в целом на территории России за период 1976 – 2006 гг. преобладает увеличение годовых сумм осадков на 1 – 20 мм/10 лет. Это согласуется с результатами, полученными в работе [40], в которой сказано, что в России в целом количество осадков за период 1976 – 2006 гг. возросло.

В теплое полугодие на ЕТР наблюдается уменьшение количества осадков (значимые отрицательные тренды наблюдаются в центральной части ЕТР), а в Сибири, наоборот, преобладает их увеличение – районы со значимыми положительными трендами на Алтае, в Саянах и в бассейнах Лены и Алдана (рис. 1.8). При этом в целом в теплое полугодие изменение количества осадков статистически мало-достоверно.

Осадки холодного полугодия анализировались за октябрь – март. В холодное полугодие также наблюдается увеличение количества осадков почти на всей территории России (рис. 1.9).

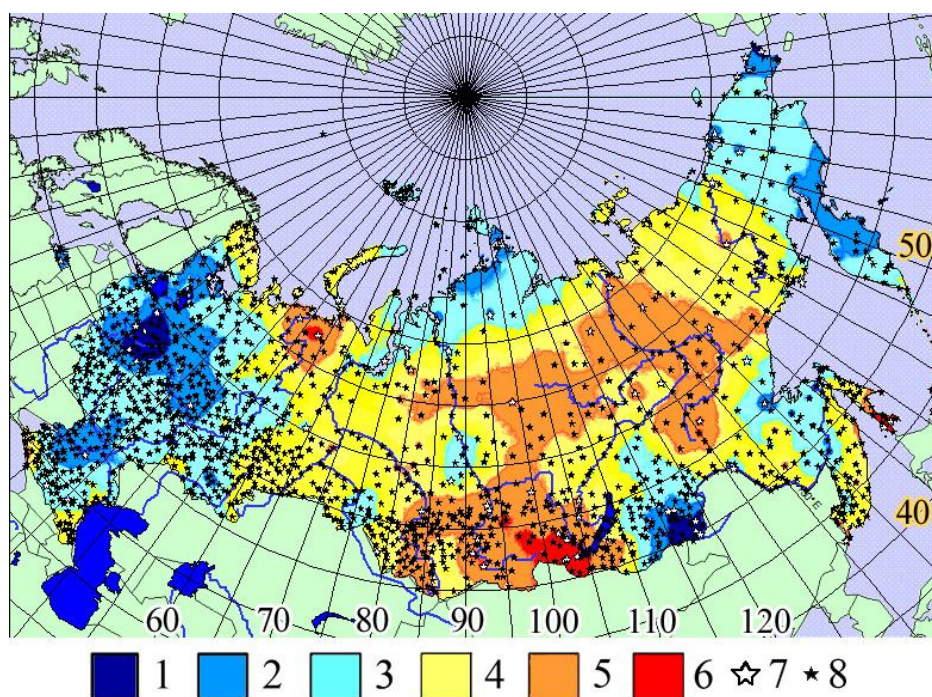


Рис. 1.8. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда осадков теплого полугодия (апрель – сентябрь) в мм/10 лет за период 1976 – 2006 гг.: 1 – $-30 \leq k < -20$; 2 – $-20 \leq k < -10$; 3 – $-10 \leq k < 0$; 4 – $0 \leq k < 10$; 5 – $10 \leq k < 20$; 6 – $20 \leq k < 30$; 7 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 8 – станции с незначимым трендом

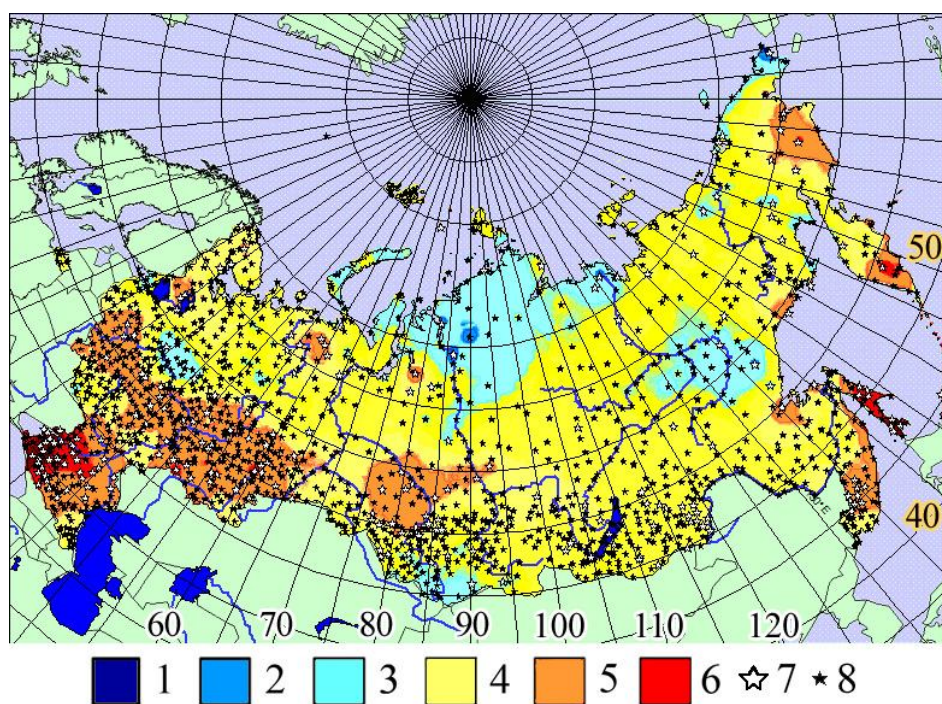


Рис. 1.9. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда осадков холодного полугодия (октябрь – март) в мм/10 лет за период 1976 – 2006 гг.: 1 – $-30 \leq k < -20$; 2 – $-20 \leq k < -10$; 3 – $-10 \leq k < 0$; 4 – $0 \leq k < 10$; 5 – $10 \leq k < 20$; 6 – $20 \leq k < 30$; 7 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 8 – станции с незначимым трендом

На преобладающей части территории России тренды составляют до 10мм/10 лет и статистически не достоверны. А в южной половине ЕТР, в верховьях Оби, на Камчатке и Чукотке положительные тренды составляют 10 – 20мм/10 лет, их достоверность на 95%-ном уровне. Сопоставление осадков теплого и холодного полугодий показывает противоположные тенденции на ЕТР (тренды отрицательные в теплое полугодие и положительные – в холодное полугодие), а восточнее Урала в обоих полугодиях растет количество осадков.

Увеличение количества осадков в холодное полугодие статистически более достоверно. Этот вывод хорошо согласуется с результатами, описанными ранее в работе [39], которые были получены по более ранним данным с привлечением меньшего количества станций.

Аномалии высоты снежного покрова

По среднемесячным данным о высоте снежного покрова вычислялась средняя высота за все месяцы года со снегом на станции. Изменение высоты снежного покрова оценивалось по величине отклонения средней высоты за 1991 – 2005 гг. от нормы высоты за 1961 – 1990 гг. Обработано 577 станций, вычисленные аномалии (h_a) показаны на карте рис. 1.10.

Значимые положительные аномалии высоты снежного покрова наблюдаются на преобладающей территории России (рис. 1.10). Они составили от 2 до 6 см и более. В восточной части ЕТР, в Западной и Восточной Сибири, в Приморье и на Камчатке положительные аномалии имеют наибольшую величину и статистически значимы. Слабые отрицательные аномалии высоты снежного покрова наблюдаются на небольших участках в самой западной части ЕТР, в Забайкалье, в верховье Лены и на Чукотке.

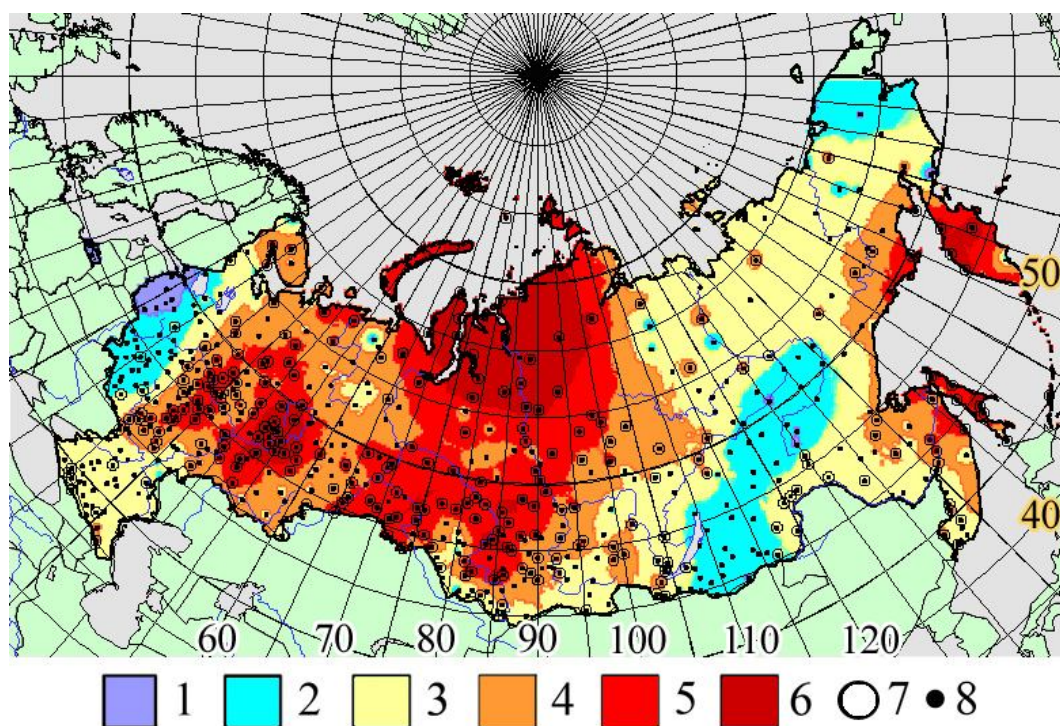


Рис. 1.10. Аномалии средней за сезон высоты (см) снежного покрова в 1991 – 2005 гг. от нормы 1961 – 1990 гг.: 1 – $-4 < h_a \leq -2$; 2 – $-2 < h_a \leq 0$; 3 – $0 < h_a \leq 2$; 4 – $2 < h_a \leq 4$; 5 – $4 < h_a \leq 6$; 6 – $6 < h_a$; 7 – значимые аномалии; 8 – станции

Приведенные сведения об изменениях различных показателей современного климата являются обоснованием для исследований, связанных с ними геоэкологических последствий. Результаты таких исследований изложены в последующих главах.

Выводы

1. По наблюдениям за 1976 – 2006 гг. на всей сети метеорологических станций России показано, что наиболее интенсивное и статистически значимое увеличение температуры воздуха произошло на ЕТР (кроме Севера), на юге Западной Сибири, на всех широтах в Восточной Сибири, в Приамурье, на Камчатке и на севере Дальнего Востока.

2. За период 1976 – 2006 гг. по полной сети станций выявлено, что в целом на территории России преобладает увеличение годовых сумм осадков. При этом увеличение количества осадков в холодное полугодие статистически более достоверно. Существенное увеличение количества осадков произошло на юге Западной и Восточной Сибири и в Приуралье.

3. Значимые положительные аномалии высоты снежного покрова за период 1991 – 2005 гг. от норм 1961 – 1990 гг. наблюдаются на преобладающей части территории России. При этом наиболее су-

ущественные положительные аномалии зафиксированы на востоке ЕТР, на обширных территориях Западной и Восточной Сибири, в Приморье и на Камчатке.

Таким образом, по данным последних 30 и более лет, охватывающим шесть лет XXI века, показано, что в России продолжают изменения важнейших элементов климата, определяющих состояние мерзлоты. При этом по всем важнейшим метеорологическим характеристикам (температура, осадки, снежный покров) в Сибири произошли самые существенные изменения. Следовательно, на территории многолетней мерзлоты в Сибири могут возникать наиболее серьезные последствия изменений климата. Поэтому при исследовании последствий изменения климата Сибирь заслуживает пристального изучения как регион с ярко выраженными изменениями климата.

ГЛАВА 2. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВОГРУНТОВ ОТ НАЗЕМНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

2.1. Многолетнемерзлые почвогрунты России

На территории России лежит обширная область, где на некоторой глубине ниже слоя сезонных колебаний температуры почвогрунты не оттаивают в теплое время года, – это область сплошной многолетней мерзлоты. Большое влияние на состояние мерзлоты, кроме климата, оказывают особенности рельефа и растительности. Граница многолетней мерзлоты проходит от Кольского полуострова по Крайнему Северу европейской части России, спускается к югу в Западной Сибири и резко опускается к югу восточнее Енисея. Южная граница многолетней мерзлоты на многих участках совпадает с изотермой среднегодовой температуры подстилающей поверхности, равной 0°C [57].

Более точными следует признать сведения о мерзлоте, полученные по данным о среднегодовой температуре почвогрунтов на глубинах, поэтому в последующих разделах будет представлен подробный анализ всех имеющихся данных наблюдений на гидрометеорологических станциях. В некоторых районах мерзлые участки на глубинах встречаются при положительной среднегодовой температуре поверхности почвы, они обусловлены не современным климатом, а климатом геологических эпох [57], и находятся в состоянии медленной деградации. Глубина залегания верхней границы многолетнемерзлых почвогрунтов зависит от радиационного баланса, высоты снежного покрова, наличия растительного покрова, теплопроводности почвогрунтов.

Многолетняя мерзлота является следствием сурового климата, однако человек и экологические системы приспособились к этим условиям; деградация мерзлоты в большинстве случаев приводит к негативным последствиям. В зоне мерзлоты сложились определенные условия, которые человек научился использовать себе во благо. Так, например, в Восточной Сибири многолетняя мерзлота является благоприятным фактором земледелия, поскольку мерзлый слой не пропускает в глубь почвогрунтов то малое количество осадков, которое выпадает в этом районе. Зимой грунтовая вода замерзает и не уходит с подземным стоком, а весной при оттаивании верхние слои почвогрунтов получают дополнительную влагу снизу. Летние осадки не впитываются в мерзлый грунт, это приводит к увеличению стока северных сибирских рек [57] и т.д.

В настоящее время площадь многолетней мерзлоты постепенно сокращается. Многочисленные находки ныне вымерших животных – мамонта, носорога, мускусного быка, весьма хорошо сохранившихся в слое многолетней мерзлоты – свидетельствуют о том, что многолет-

няя мерзлота имеет значительную древность и, главное, что она была непрерывной [98].

Криолитозона является результатом длительного и глубокого выхолаживания поверхности. Формирование мерзлоты произошло еще в ледниковое время, когда суровый, малоснежный резко-континентальный климат был выражен еще резче, чем в настоящее время. Так, в течение сотен и тысяч лет происходило постепенное «накопление холода». Понижалась температура мерзлых пород, увеличивалась их мощность.

Многолетнемерзлые породы находятся в тесной взаимосвязи с большим числом компонентов природной среды. Поэтому история их формирования и деградации может рассматриваться только в связи с общим ходом развития природного процесса [118].

Н.И. Толстихин и Н.А. Цытович [107] предложили следующее определение мерзлых пород [66]: «Мерзлыми породами, грунтами, почвами называются породы, грунты, почвы, имеющие отрицательную или нулевую температуру, в которых хотя бы часть воды перешла в кристаллическое состояние». П.Ф. Швецов предложил породы грунты, почвы, имеющие отрицательную температуру, но не содержащие льда, называть морозными. Из определения мерзлой породы видно, что лед в ней должен рассматриваться как породообразующий минерал. Поэтому к мерзлым породам следует относить все горные породы, почвы и грунты, содержащие лед [66].

Многолетняя криолитозона, верхний слой земной коры, характеризующийся устойчивой в течение многих лет отрицательной или нулевой температурой, обеспечивающей круглогодичное и длительное (не менее двух лет подряд) сохранение подземного льда. Верхнюю часть многолетней криолитозоны составляют многолетнемерзлые горные породы и подземные ледяные тела, образующие мерзлую зону литосферы, нижнюю – морозные горные породы и непромерзающие горизонты сильноминерализованных подземных вод. Отрицательные значения средней годовой температуры земной поверхности – необходимое условие ее возникновения [110].

Климатические условия нашей эпохи благоприятствуют сохранению мерзлоты в высокоширотных регионах. Однако в последние десятилетия в связи с изменением климата на южных окраинах зоны многолетней мерзлоты условия для сохранения мерзлоты становятся менее благоприятными.

Наблюдения за температурой почвогрунтов на отдельных метеорологических станциях начинались в конце XIX века, иногда они прерывались. Среднегодовые значения температуры воздуха и температуры почвогрунтов на глубине 320 см (T_{320}) по наблюдениям на станции Иркутск показаны на рис. 2.1.

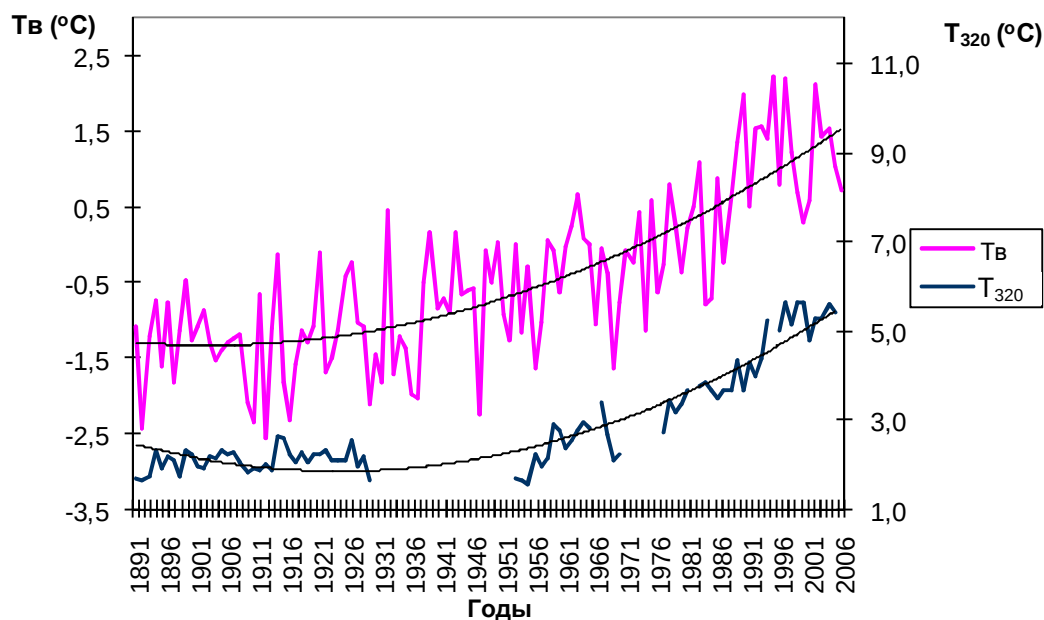


Рис. 2.1. Среднегодовая температура воздуха ($T_{\text{в}}$) и почвогрунтов на глубине 320 см (T_{320}) по наблюдениям на станции Иркутск

Из рис. 2.1 видно, что потепление климата ($T_{\text{в}}$) в Иркутске с начала XX века по настоящее время сопровождается повышением температуры почвогрунтов на глубине 320 см (T_{320}). В Красноярске регулярные наблюдения начаты с 1930 года (рис. 2.2), тренд температуры почвогрунтов на глубине 320 см положительный. Во всех случаях достоверность трендов не вызывает сомнений ($>95\%$). Коэффициент корреляции между среднегодовой температурой воздуха и среднегодовой температурой почвогрунтов на глубине 320 см составляет в Иркутске $r=0,81$ за 1891 – 2006 гг. (за исключением интервалов без данных), а в Красноярске $R=0,67$ за 1930 – 2006 гг.

Однако температура воздуха является не единственным фактором, ответственным за состояние мерзлых почвогрунтов. Несмотря на столь высокие коэффициенты корреляции между температурой почвогрунтов и температурой воздуха, необходимы дополнительные количественные оценки влияния на состояние мерзлых пород других метеорологических факторов в меняющемся климате. Важнейшими метеорологическими факторами являются температура воздуха и высота снежного покрова. Как будет показано далее, соотношение этих факторов и степень их влияния на температуру почвогрунтов существенно отличаются в разных регионах.

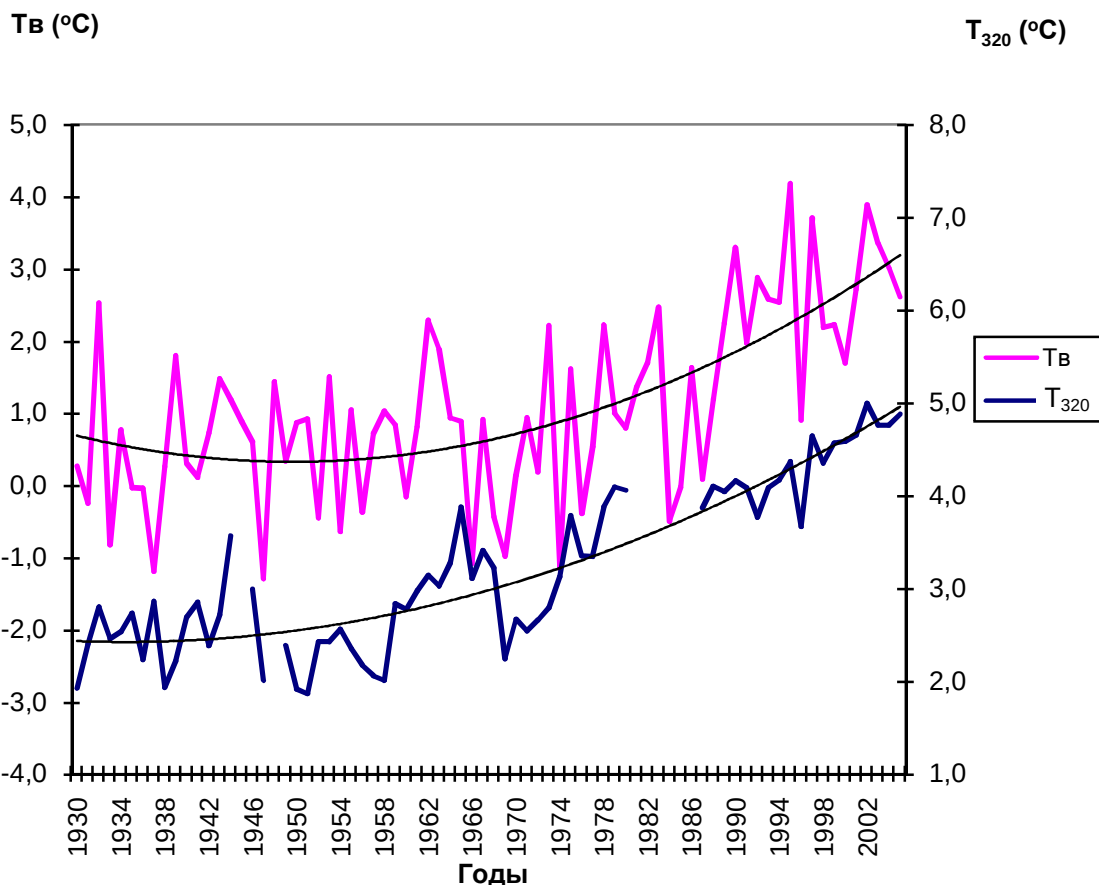


Рис. 2.2. Среднегодовая температура воздуха ($T_{\text{в}}$) и почвогрунтов на глубине 320 см (T_{320}) по наблюдениям на станции Красноярск

Угроза деградации мерзлоты очень актуальна для России [44, 104]. В России зона многолетней мерзлоты занимает около 65% территории и охватывает значительную часть Сибири и Дальнего Востока [87]. Эти регионы имеют стратегическое значение для страны. В пределах криолитозоны России сосредоточено более 30% разведанных запасов всей нефти страны, около 60% природного газа, залежи каменного угля и торфа, большая часть гидроэнергоресурсов, запасов цветных металлов, золота и алмазов, огромные запасы древесины и пресной воды. Здесь создана дорогостоящая и уязвимая инфраструктура: нефтегазопромысловые объекты, магистральные нефте- и газопроводы протяженностью в тысячи километров, шахты и карьеры, гидроэлектростанции, возведены города и поселки, построены автомобильные и железные дороги, аэродромы и порты [87].

Данные о потеплении климата и недостаточно полные сведения о последствиях этого потепления в мерзлых почвогрунтах определили необходимость более подробного изучения изменений в термическом состоянии почвогрунтов в зоне мерзлоты.

Зависимость температуры почвогрунтов от различных характеристик климата будет рассмотрена в следующем разделе за последние 40 лет по всем гидрометеорологическим станциям России, на которых в 1960 гг. начались систематические наблюдения за температурой почвогрунтов по вытяжным термометрам до глубин 320 см.

2.2. Оценки границ зоны многолетнемерзлых почвогрунтов по климатическому индексу на основе данных о температуре воздуха

Оценки состояния многолетней мерзлоты чаще всего проводят по наблюдениям за температурой воздуха. Несмотря на то, что они являются косвенными, у них есть свои преимущества. Преимущества таких оценок основаны на более густой сети метеорологических станций, по сравнению с данными о температуре почвогрунтов по вытяжным термометрам или по наблюдениям на стационарах.

Густота станций с данными о температуре воздуха примерно в три раза больше, чем с данными о температуре почвогрунтов. В настоящей работе для анализа были привлечены данные всех 1612 действующих метеорологических станций России. Использовались среднемесячные значения температуры воздуха.

Условия, благоприятные для существования многолетней мерзлоты, определялись по индексу суровости климата (I) В.П. Нечаева. Индекс представляет собой частное от деления температуры воздуха самого холодного месяца (января) на температуру самого теплого месяца года (июля) [77]. Значениям индекса менее -1,0 соответствуют благоприятные условия для существования мерзлых почвогрунтов вообще, а значениям индекса менее -2,0 соответствуют благоприятные условия для сохранения сплошных мерзлых почвогрунтов [77].

Индекс суровости I вычислялся за период 1961 – 1990 гг. и отдельно за период 1991 – 2005 гг. На рис. 2.3 показаны площади, занятые значениями $I < -1$ в 1961 – 1990 и в 1991 – 2005 гг.

Из рисунка видно, что за последние 15 лет, по сравнению с нормой, площадь регионов с климатическими условиями ($I < -1$), благоприятными для существования мерзлых почвогрунтов, сократилась.

На рис. 2.4 показаны площади, занятые значениями индекса суровости $I < -2$, аналогично по двум периодам. Из этого рисунка видно, что почти на 50% сократилась площадь с условиями ($I < -2$), благоприятными для сохранения сплошных мерзлых почвогрунтов на территории России.

Следует подчеркнуть, что полученные оценки изменений площади, относятся к изменению атмосферных температурных условий в пределах зоны многолетней мерзлоты, влияющих на ее состояние, а не к фактическому изменению площади многолетнемерзлых почвогрунтов.

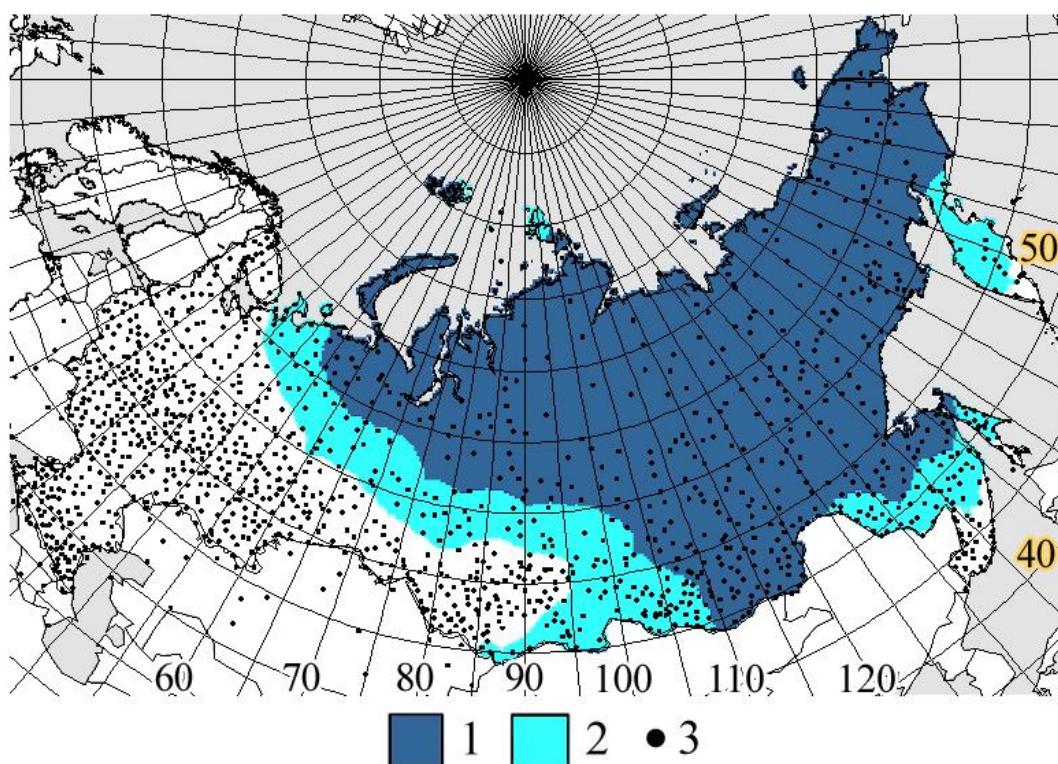


Рис. 2.3. Пространственное распределение индекса суровости климата В.П. Нечаева ($I < -1$): 1 – районы, благоприятные для существования мерзлых почвогрунтов ($I < -1$) в 1961 – 1990 гг. и сохранившиеся в 1991 – 2005 гг.; 2 – районы, благоприятные для существования мерзлых почвогрунтов ($I < -1$) в 1961 – 1990 гг., но не сохранившиеся в 1991 – 2005 гг.; 3 – метеостанции

Полученные результаты подтверждают сокращение площади территории, на которой сохраняются благоприятные атмосферные термические условия для существования многолетней мерзлоты [116].

Подсчеты площадей, выделенных на картах рис. 2.3 и 2.4 показали, что за период 1991 – 2005 гг. произошло сокращение, по сравнению с нормами (1961 – 1990 гг.), примерно на 30% площади территории с условиями в атмосфере, благоприятными для существования мерзлых почвогрунтов, включая участки с островной и прерывистой мерзлотой.

За тот же период почти на 50% сократилась территория с условиями в атмосфере, благоприятными для сохранения сплошных мерзлых почвогрунтов на территории России (без островной и прерывистой мерзлоты).

Данные основных информационных объектов мониторинга криолитозоны показывают, что сокращение площади многолетне-мерзлых пород пока не достигло тех масштабов, о которых косвенно свидетельствуют наблюдаемые в атмосфере изменения. Расхождения

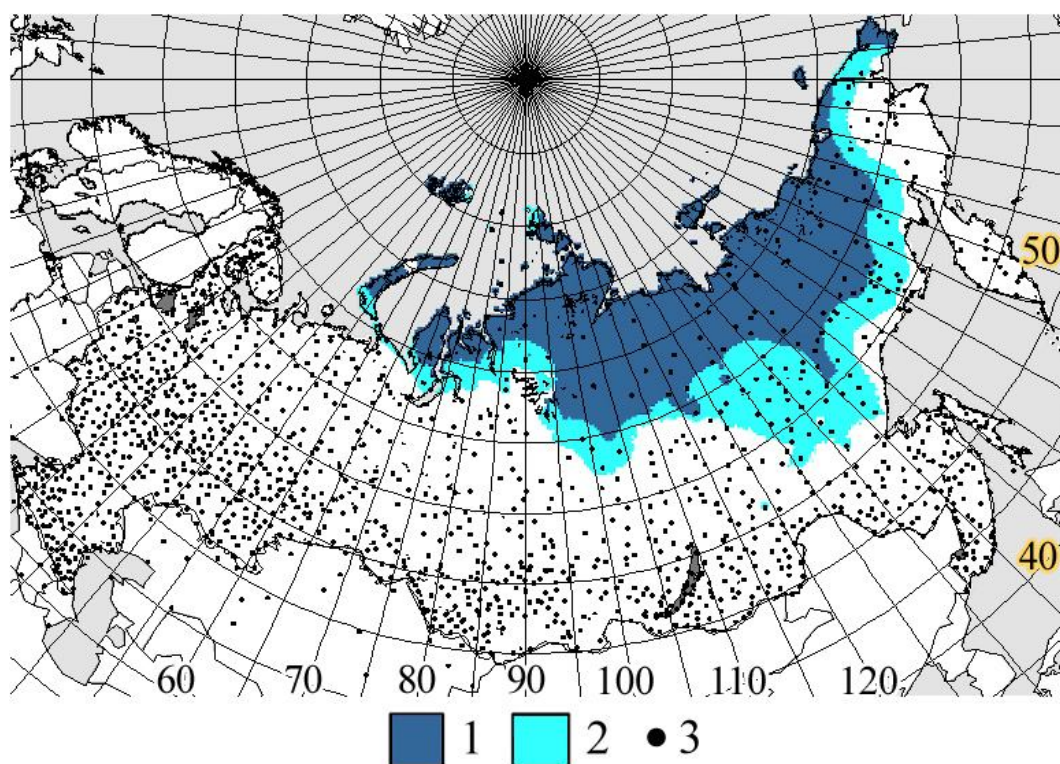


Рис. 2.4. Пространственное распределение индекса суровости климата В.П. Нечаева ($I < -2$): 1 – районы, благоприятные для сохранения сплошных мерзлых почвогрунтов ($I < -2$) в 1961 – 1990 гг. и сохранившиеся в 1991 – 2005 гг.; 2 – районы, благоприятные для сохранения сплошных мерзлых почвогрунтов ($I < -2$) в 1961 – 1990 гг., но не сохранившиеся в 1991 – 2005 гг.; 3 – метеостанции

связаны как с большим запаздыванием деградации многометровых толщ мерзлых пород, так и с дополнительными климатическими факторами, дополняющими влияние температуры воздуха на температуру почвогрунтов. Поэтому необходим более подробный анализ различных климатических факторов, влияющих на температуру почвогрунтов в зоне мерзлоты.

Как известно, важнейшим звеном передачи изменений климата атмосферы в почвогрунты на глубины до 320 см и глубже являются теплофизические свойства почвогрунтов, определяющие теплопотоки в почвогрунтах. Некоторые возможности получения косвенных оценок теплофизических свойств почвогрунтов по данным метеорологических наблюдений приводятся в следующем разделе.

2.3. Запаздывание годового хода температуры почвогрунтов на глубинах 80 – 320 см по мере их увеличения

Согласно закону теплопроводности Фурье, волны тепла распространяются от поверхности почвогрунтов на глубины с отставанием по фазе и с уменьшением амплитуды колебаний по мере увеличения

глубины [66]. Изменения фазы и амплитуды в различных почвогрунтах не одинаковы, они определяются теплопроводностью и теплоемкостью почвогрунтов, которые в свою очередь определяются их составом, плотностью, влажностью и фазовым состоянием воды в них.

Ежедневные наблюдения за температурой почвогрунтов на метеостанциях по вытяжным термометрам до глубины 320 см позволяют определять сдвиг фазы годового хода (запаздывание) температуры на выбранном нижнем уровне относительно другого, более верхнего уровня. Величину сдвига годового хода температуры почвогрунтов между двумя уровнями можно рассматривать как некоторую обобщенную оценку теплофизических свойств слоя почвогрунтов между рассматриваемыми уровнями.

По данным ежедневных наблюдений температуры почвогрунтов за 1977 – 2006 гг. вычислялся осредненный годовой ход температуры на глубине 80 и отдельно – на глубине 160 и 320 см. По полученным значениям годового хода (365 суток) по данным двух уровней были вычислены асинхронные коэффициенты корреляции со сдвигами до 100 суток. Уменьшения длины ряда при расчетах не происходило при сдвигах, так как недостающие значения в конце года дополнялись соответствующими значениями начала года. По наилучшему коэффициенту асинхронной корреляции между полученными осредненными значениями годового хода на двух уровнях определялся сдвиг, при котором достигалось наилучшее совмещение кривых годового хода на этих двух уровнях. Расчеты сдвигов выполнены по 574 станциям России. Эти сдвиги нанесены на карту (рис. 2.5).

На территории России сдвиг годового хода температуры в слое между 80 и 160 см различен по регионам. В северных половинах ЕТР и Западной Сибири он составляет 13 – 19 суток. В южных половинах указанных районов сдвиг составляет 19 – 22 суток, а в Восточной Сибири сдвиг составляет 19 – 25 суток и более.

Аналогично были получены сдвиги между уровнями 80 и 320 см (рис.2.6). Карта сдвигов годового хода между уровнями 80 и 320 см показывает, что в зоне многолетней мерзлоты наблюдается наибольшее запаздывание и составляет там 60 – 80 суток и более, а в других областях запаздывание менее 50 – 60 суток или менее 50 суток. Большое запаздывание по фазе годового хода в зоне мерзлоты показывает особые теплофизические свойства почвогрунтов в этой зоне, предположительно связанные с задержкой при фазовых переходах вода–лед от лета к зиме и обратно – от зимы к лету – в почвогрунтах с большим содержанием льда.

Полученные результаты показывают, что в зоне мерзлоты сложились некоторые особые свойства почвогрунтов, отличные от

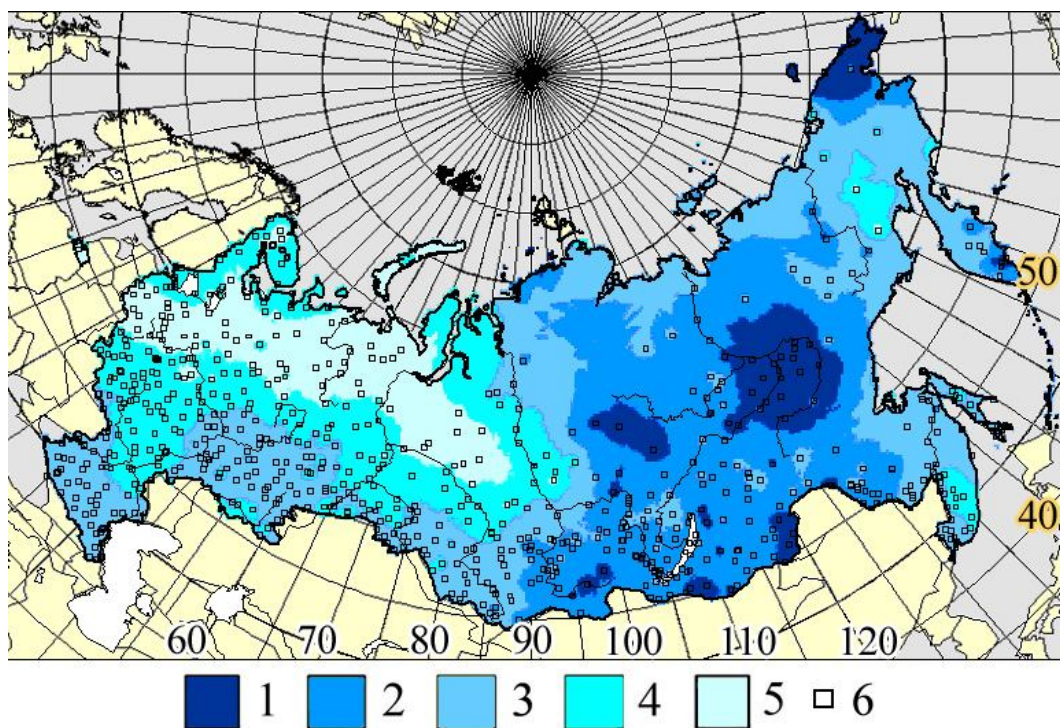


Рис. 2.5. Сдвиг (d – запаздывание в днях) между годовым ходом температуры на глубинах 160 и 80 см: 1 – $d > 25$; 2 – $22 < d \leq 25$; 3 – $19 < d \leq 22$; 4 – $16 < d \leq 19$; 5 – $13 < d \leq 16$; 6 – метеостанция

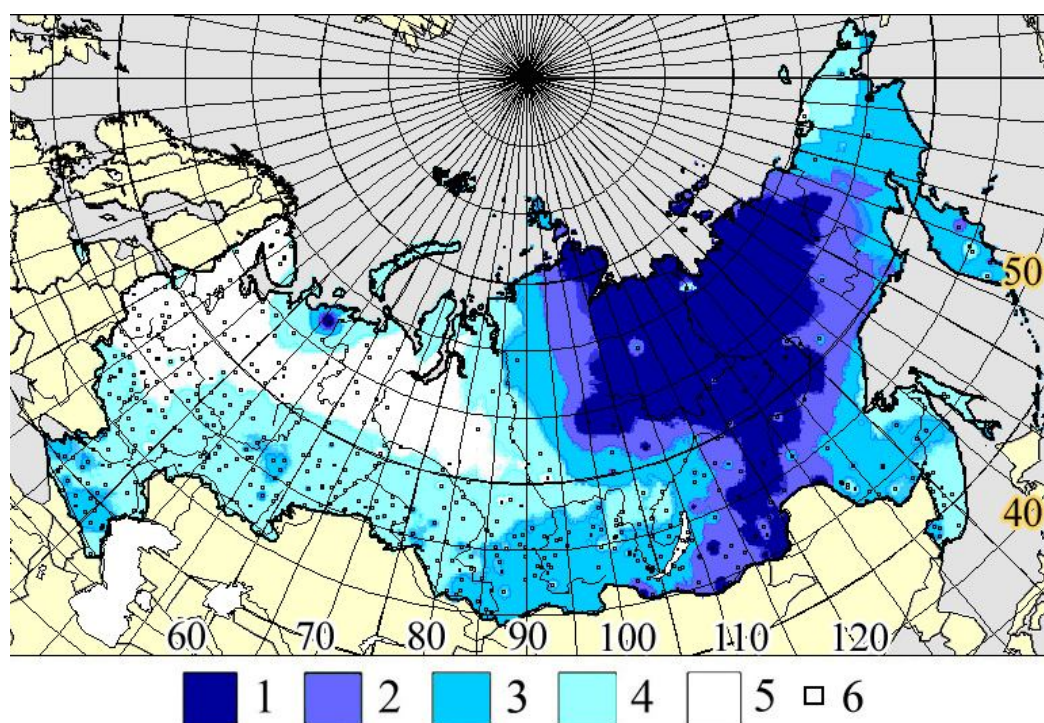


Рис. 2.6. Сдвиг (d – запаздывание в днях) между годовым ходом температуры на глубинах 320 и 80 см: 1 – $d \geq 80$; 2 – $70 \leq d < 80$; 3 – $60 \leq d < 70$; 4 – $50 \leq d < 60$; 5 – $d < 50$; 6 – метеостанция

свойств в других регионах, влияние которых ослабляет проникновение волны годового хода из вышележащих слоев в нижележащие.

Далее рассматриваются корреляции температуры почвогрунтов на разных глубинах с температурой воздуха и высотой снежного покрова.

2.4. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России

В исследовании [49] отмечается наличие деградации криолитозоны, что объясняется повышением температуры воздуха, а в ряде районов и увеличением снегонакопления.

В [51] получены выводы о положительных трендах среднегодовой температуры почвогрунтов по данным наблюдений на 22 станциях, в основном охватывающих север Восточно-Европейской равнины (в границах России) на глубинах 80 и 160 см. Температурный режим на глубине 320 см в указанной работе не рассматривался по причине отсутствия в то время электронного массива данных на глубине 320 см. Во многих работах, выполненных ранее, масштабные исследования сдерживались недостатком данных наблюдений. По данным [84], вся огромная территория Средней Сибири является «белым пятном» в отношении изученности режима геокриологических условий. Это обусловлено в том числе недостаточным количеством геокриологических стационаров. Одним из следствий недостатка данных является использование математических моделей криолитозоны [25], которые, однако, не могут полностью заменить натурные наблюдения.

Создание нового электронного массива данных о температуре почвогрунтов по данным вытяжных термометров до глубины 320 см на всех станциях, производящих такие наблюдения, по наблюдениям за последние четыре десятилетия дало новые возможности для проведения более подробных исследований, основанных на натурных данных.

В работе [109] уже использовались данные метеорологических станций, однако только за период с 1969 по 1990 г. Современные изменения температуры почвогрунтов в [109] остались без рассмотрения. В результате в указанной работе получен вывод о том, что в Предбайкалье, Приморье и на северо-востоке России рост температуры воздуха за данный период практически отсутствует. Не зафиксировано в [109] и повышения температуры почвогрунтов. Эти выводы не соответствуют более современным данным об изменении температуры воздуха [41] и об изменении температуры почвогрунтов [113, 115, 116]. В работах [49, 51, 84, 109] анализ проводился по малочисленной сети геокриологических стационаров или по выборочным гидрометеорологическим станциям.

Такой анализ не позволил ранее построить карты распределения коэффициентов временной корреляции и обнаружить пространственные особенности корреляций между наземными метеорологическими параметрами и температурой почвогрунтов. К тому же ряды, по которым ранее проводились исследования, не охватывали последние годы.

Поэтому в данном разделе работы была поставлена задача: за последние четыре десятилетия (с 1965 по 2006 г.) по данным инструментальных наблюдений всех метеорологических станций на территории России получить оценки влияния температуры воздуха и высоты снежного покрова на изменение температуры почвогрунтов на глубинах до 320 см с детализацией по территории России. Другие региональные факторы – растительность, влажность, структура почвогрунтов и т.д. – не рассматриваются.

Анализировались соотношения между температурой почвогрунтов на глубинах и метеорологическими условиями над ними для зимних и летних периодов. Раздельный анализ самого холодного и самого теплого сезонов проводился с целью дифференцированного описания сезонных особенностей формирования среднегодовой температуры почвогрунтов. При этом исключение переходных сезонов сделано для более контрастного выявления сезонных различий.

Для выявления наличия зависимости между рассматриваемыми факторами применялся метод корреляционного анализа с оценкой значимости коэффициентов корреляции. При сорокалетней выборке (для 40 пар данных) коэффициент корреляции 0,4 является доверительной границей для 99%-ного уровня значимости по критерию Стьюдента.

Корреляции вычислялись по каждой отдельной станции, а построение карт пространственного распределения коэффициентов корреляций проводилось с применением геоинформационной системы.

Для количественной оценки вклада различных факторов в многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов применялся регрессионный анализ с оценкой вклада каждого фактора в уравнение регрессии. Вклад оценивался в процентах, как доля дисперсии ряда, связанная с каждым отдельным фактором, относительно общей дисперсии анализируемого ряда.

Корреляции между температурой почвогрунтов и температурой воздуха

По данным на метеорологических станциях о среднесезонных значениях температуры воздуха и температуры почвогрунтов на глубинах 80, 160 и 320 см вычислялись коэффициенты корреляции за 1965 – 2006 гг. Вычисленные значения наносились на карту для дальнейшего анализа пространственного распределения коэффициентов временной корреляции между температурой воздуха и температурой почвогрунтов.

Карты коэффициентов корреляции построены отдельно для летнего и зимнего сезонов для глубин 80, 160 и 320 см. В расчетах использовались значения зимних температур воздуха за декабрь–февраль и летних температур за июнь–август. Известно, что проникновение волн тепла и холода от поверхности почвы на глубины происходит с запаздыванием от 1 до 6 месяцев, поэтому корреляции зимних температур воздуха вычислялись со средней температурой почвогрунтов за три самых холодных месяца на анализируемой глубине, а корреляции летних температур воздуха вычислялись со средней температурой почвогрунтов за три самых теплых месяца на анализируемой глубине (см. раздел 1.3).

В результате анализа карт обнаружены особенности корреляций в зоне многолетней мерзлоты России на всех глубинах, но в качестве иллюстраций приводятся только карты коэффициентов временной корреляции по данным на глубине 160 см.

Пространственные различия в корреляциях между температурой почвогрунтов на глубине 160 см и температурой воздуха летом представлены на рис.2.7.

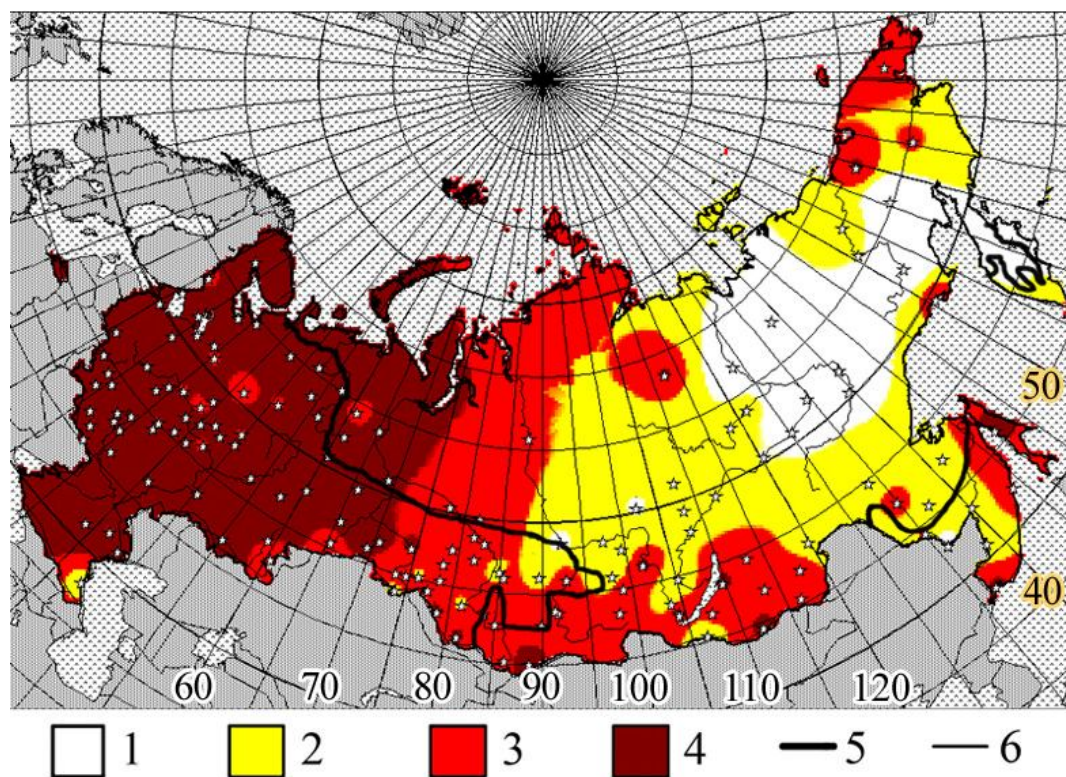


Рис. 2.7. Пространственное распределение коэффициентов корреляции (r) между температурой воздуха и температурой почвогрунтов на глубине 160 см летом: 1 – $0,1 \leq r < 0,2$; 2 – $0,2 \leq r < 0,4$; 3 – $0,4 \leq r < 0,6$; 4 – $0,6 \leq r < 0,8$; 5 – южная граница многолетней мерзлоты; 6 – граница России

На территории Российской Федерации от западной границы до меридиана 75° в.д. между летней (со сдвигом) температурой почвогрунтов на глубине 160 см и летней температурой воздуха (средняя температура за сезон июнь – август) наблюдаются значимые положительные коэффициенты корреляции $r > 0,6$. Восточнее меридиана 75° в.д. наблюдаются значимые коэффициенты корреляции от 0,4 до 0,5 на территории Западной Сибири, на юге Восточной Сибири, а также на станциях Дальнего Востока в районе Сахалина и Чукотки. Таким образом, летом на указанной территории зависимость между температурой почвогрунтов на глубине 160 см и температурой воздуха является положительной и статистически достоверной с вероятностью $> 99\%$. На остальной части Восточной Сибири и Дальнего Востока летом наблюдаются незначимые положительные $r < 0,4$ или близкие к нулю коэффициенты корреляции между температурой почвогрунтов на глубине 160 см и температурой воздуха.

На глубине 80 см влияние температуры воздуха летом на температуру почвогрунтов выражено сильнее, чем на глубине 160 см, коэффициенты корреляции 0,6 – 0,8 для глубины 80 см охватывают западную часть Российской Федерации до меридиана 90° в.д., а область значимых положительных коэффициентов корреляции 0,4 – 0,6 распространяется дальше на Восток до меридиана 115° в.д., за исключением районов Норильска, Томска и района слияния рек Енисея и Ангары, где корреляции положительные, но незначимые. Еще восточнее наблюдаются значимые положительные корреляции в нижнем течении реки Колыма, в районах Билибино и Марково. На глубине 80 см обширнее, чем для глубины 160 см, область значимых положительных корреляций на юге Сибири и Дальнего Востока. Корреляции, близкие к нулю на глубине 80 см, наблюдаются в средних течениях рек Вилюй, Лена, Алдан и в верховьях рек Колыма и Омолон, на Камчатке.

На глубине 320 см летом влияние температуры воздуха на температуру почвогрунтов выражено слабее, чем на глубине 160 см, коэффициенты корреляции для глубины 320 см только на Восточно-Европейской равнине составляют 0,6 – 0,7. За Уралом на всех широтах корреляция ослабевает, область значимых положительных коэффициентов корреляции $r > 0,4$ распространяется от Урала на восток на всех широтах только до меридиана 80° в.д., а восточнее значимые коэффициенты от 0,4 до 0,6 – только на самом юге Сибири, в верховьях Енисея, Ангары и в Забайкалье. На остальной части Восточной Сибири и Дальнего Востока наблюдаются незначимые положительные коэффициенты корреляции.

На рис. 2.7 схематично показана граница многолетней мерзлоты по данным [88]. Сопоставление с ее границами коэффициентов корреляции между летней температурой почвогрунтов и температурой воз-

духа показывает, что летом самые высокие положительные корреляции на всех рассмотренных глубинах прослеживаются преимущественно вне зоны многолетней мерзлоты. На ее северо-западных, северо-восточных и южных участках коэффициенты корреляции (r) находятся в интервале от 0,4 до 0,6, оставаясь при этом значимыми. А в обширной центральной части зоны многолетней мерзлоты летом корреляции между температурой воздуха и температурой почвогрунтов близки к нулю.

Зимой корреляции между температурой почвогрунтов и температурой воздуха слабее, чем летом, значения $r > 0,6$ не встречаются. Значимые коэффициенты корреляции (от 0,4 до 0,6) температуры почвогрунтов на глубине 80 и 160 см с температурой воздуха зимой наблюдаются преимущественно на европейской части России (рис. 2.8).

На азиатской части Российской Федерации зимой значимая положительная корреляция $r = 0,4$ наблюдается только на отдельных станциях на юге Сибири (Алыгджер – $98,3^\circ$ в.д., $53,3^\circ$ с.ш.; Ванава – $102,3^\circ$ в.д., $60,3^\circ$ с.ш.; Бохан – $103,8^\circ$ в.д.; $53,2^\circ$ с.ш.).

Положительные коэффициенты корреляции, но статистически незначимые ($r < 0,4$), наблюдаются в южной половине Западной Сибири и частично в южной половине Восточной Сибири. На остальной большей территории Сибири и на всем Дальнем Востоке коэффициенты корреляции близки к нулю.

На глубину 320 см влияние изменений температуры воздуха зимой проникает только в южной половине Восточно-Европейской равнины (в границах России).

Следует отметить, что, несмотря на использование в анализе данных всех метеорологических станций, проводящих наблюдения за температурой почвогрунтов, их густота в высокоширотной части Сибири не достаточна для более детального описания пространственных особенностей температурных полей и их корреляций с температурой воздуха. Однако наиболее опасные процессы, создающие тенденции деградации многолетней мерзлоты, возможны прежде всего вблизи ее южной и юго-западной границ, а в этих регионах густота станций позволяет достаточно надежно описывать пространственные особенности температурных полей почвогрунтов.

Сравнение полей корреляций с границей многолетней мерзлоты показывает, что зимой влияние многолетних изменений температуры воздуха в зоне мерзлоты практически не проявляется на глубинах.

Таким образом, зимой влияние температуры воздуха на температуру почвогрунтов на глубинах 80, 160 и 320 см прослеживается преимущественно на Восточно-Европейской равнине (в границах России). На остальной территории Российской Федерации это влияние близко к нулю на всех рассмотренных глубинах.

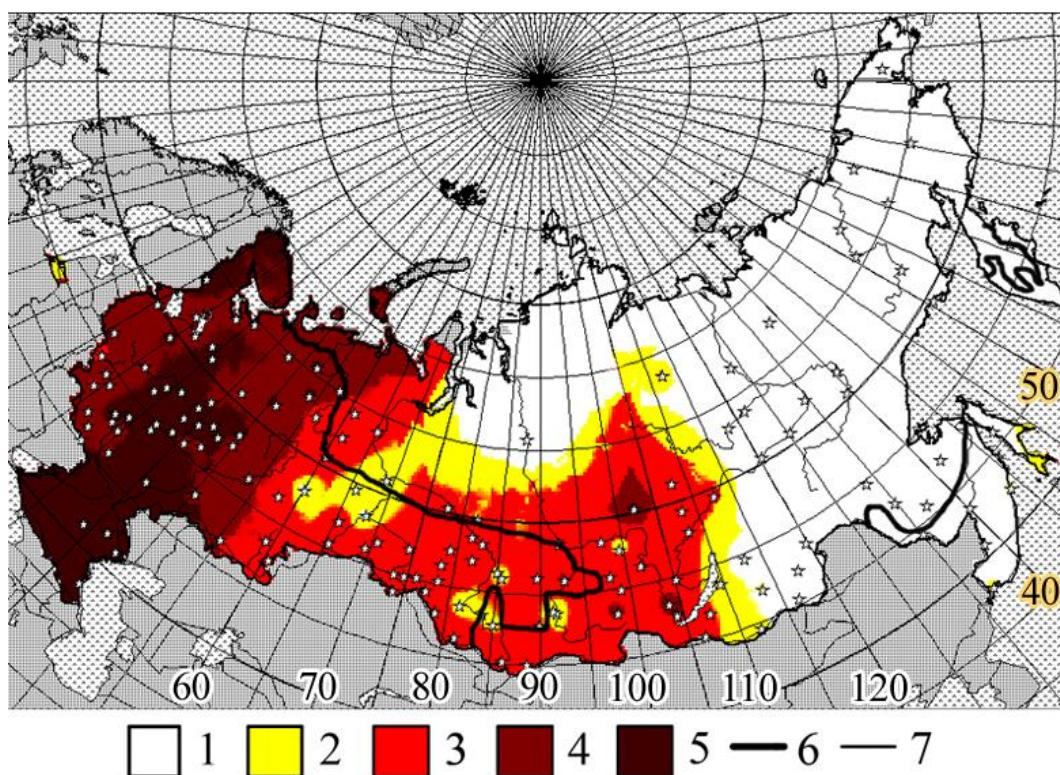


Рис. 2.8. Пространственное распределение коэффициентов корреляции (r) между температурой воздуха и температурой почвогрунтов на глубине 160 см зимой: 1 – $0,1 \leq r < 0,2$; 2 – $0,2 \leq r < 0,3$; 3 – $0,3 \leq r < 0,4$; 4 – $0,4 \leq r < 0,5$; 5 – $0,5 \leq r < 0,6$; 6 – южная граница многолетней мерзлоты; 7 – граница России

Полученные результаты о малых коэффициентах корреляции между многолетними изменениями температуры воздуха и температуры почвогрунтов в зоне мерзлоты согласуются с результатами раздела 2.3, в котором было показано ослабленное проникновение волн годового хода на глубины до 320 см в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, по сравнению с другими регионами.

Корреляции между температурой почвогрунтов и высотой снежного покрова

Причину зимнего ослабления температурных корреляций, по сравнению с летними, следует искать с привлечением дополнительных данных. В зимний период значительную роль в теплообмене между воздухом и почвогрунтами играет снежный покров [18, 81]. В качестве иллюстрации приводится карта пространственного распределения коэффициентов корреляций температуры почвогрунтов на глубине 160 см с высотой снежного покрова (рис. 2.9).

Пространственный анализ корреляций между зимней температурой почвогрунтов на глубинах и высотой снежного покрова в феврале показал, что на глубинах 80 и 160 см преобладают значимые положи-

тельные коэффициенты корреляции (r) от 0,4 до 0,6 на огромной территории России от Предуралья до восточных границ континента. Исключение составляют районы Северо-Сибирской низменности и Камчатки с корреляцией около нуля на глубинах 80 и 160 см и самый юг Восточной Сибири с корреляцией, близкой к значимой (от 0,3 до 0,4) на глубине 160 см и значимой на глубине 80 см в верховьях Оби и Енисея $r=0,4$.

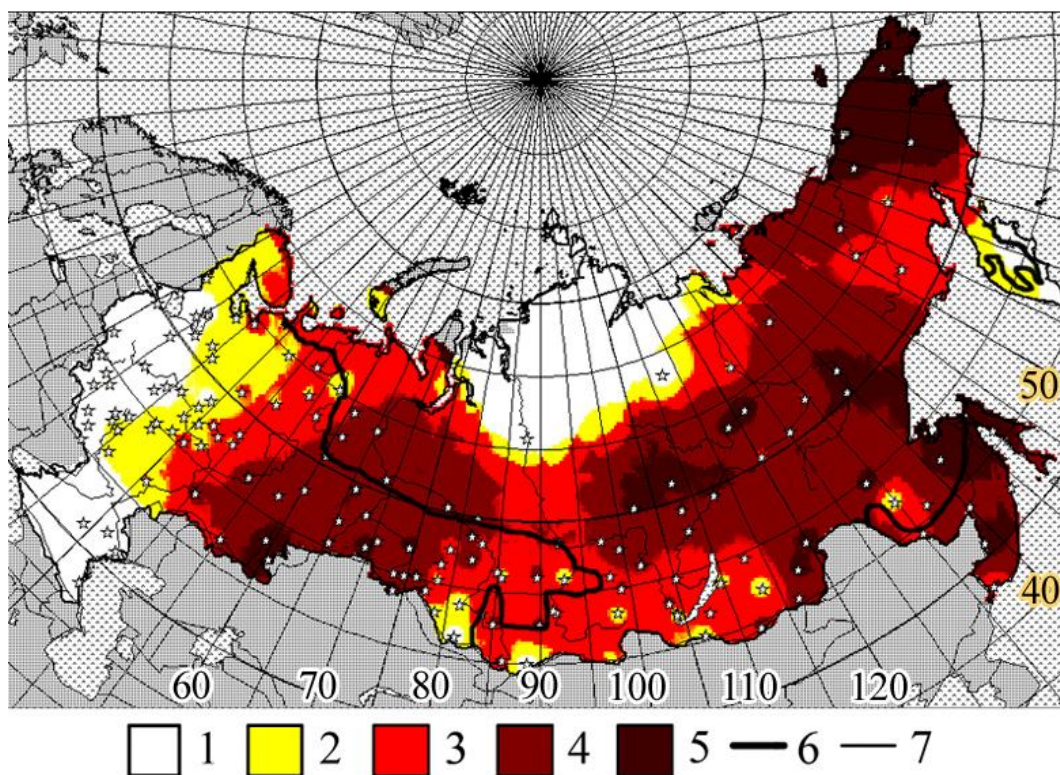


Рис. 2.9. Пространственное распределение коэффициентов корреляции (r) температуры почвогрунтов на глубине 160 см зимой с высотой снежного покрова в феврале: 1 – $0,1 \leq r < 0,2$; 2 – $0,2 \leq r < 0,3$; 3 – $0,3 \leq r < 0,4$; 4 – $0,4 \leq r < 0,5$; 5 – $0,5 \leq r < 0,6$; 6 – южная граница многолетней мерзлоты; 7 – граница России

На глубине 320 см зимой значимая положительная корреляция между температурой почвогрунтов и высотой снежного покрова наблюдается на небольшой территории только на самом юге Западной Сибири, на Вилюе, Алдане и юге Дальнего Востока.

На ЕТР зимой коэффициенты корреляции между температурой почвогрунтов на глубинах 80, 160, 320 см и высотой снежного покрова преимущественно менее 0,3 и статистически незначимы.

Таким образом, показано, что известное тепляющее влияние снежного покрова на почвогрунты проявляется не во всех регионах Российской Федерации. В Сибири это влияние прослеживается на обширных территориях на всех глубинах, но ослабевает с увеличением глубины, а на Восточно-Европейской равнине совсем не обнаруживается.

2.5. Количественные оценки вклада изменений температуры воздуха и высоты снежного покрова в изменения температуры почвогрунтов

Сезонные особенности корреляций между температурой почвогрунтов и характеристиками наземного климата (температура воздуха и высота снежного покрова) уже рассматривались в разделе 2.4. Поскольку понятие многолетней мерзлоты во многих работах тесно связывается с оценками среднегодовых температур воздуха и почвогрунтов, то необходимы исследования зависимости среднегодовой температуры почвогрунтов от характеристик наземного климата.

Среднегодовая температура почвогрунтов формируется под влиянием различных факторов внутри всего года. Как известно, летом происходит накопление тепла почвогрунтами, а зимой – его отдача в атмосферу. Снежный покров ослабляет отдачу тепла зимой и создает утепляющий эффект, влияющий на среднегодовую температуру почвогрунтов. С учетом сезонных особенностей влияния изменений климата нижней атмосферы на климат почвогрунтов необходимо количественно оценить вклад температуры воздуха и высоты снежного покрова в изменения среднегодовой температуры почвогрунтов, которая считается важнейшей характеристикой термического состояния мерзлоты.

Вклад каждого фактора вычислялся по уравнению регрессии:

$$T_{\pi} = aT_{\text{в}} + bH_{\text{с}} + c,$$

где T_{π} – среднегодовая температура почвогрунтов на заданной глубине;

$T_{\text{в}}$ – среднегодовая температура воздуха;

$H_{\text{с}}$ – высота снежного покрова в феврале (отражает снегонакопления за зимний период);

a и b – коэффициенты уравнения регрессии;

c – свободный член.

Доля дисперсии $d(T_{\text{в}})$ в процентах от общей дисперсии $D(T_{\pi})$, объясненная членом уравнения $aT_{\text{в}}$, рассматривалась как вклад температуры воздуха $T_{\text{в}}$ в общую дисперсию среднегодовой температуры почвогрунтов:

$$d(T_{\text{в}})\% = \frac{D(aT_{\text{в}})}{D(T_{\pi})} 100\%.$$

А доля дисперсии $d(H_{\text{с}})$ в процентах от общей дисперсии $D(T_{\pi})$, объясненная членом уравнения $bH_{\text{с}}$ – рассматривалась как вклад высоты снежного покрова $H_{\text{с}}$ в общую дисперсию среднегодовой температуры почвогрунтов T_{π} на заданной глубине:

$$d(H_{\text{с}})\% = \frac{D(bH_{\text{с}})}{D(T_{\pi})} 100\%.$$

Вклад двух факторов в общую дисперсию среднегодовой температуры почвогрунтов определялся как сумма $d(T_{\text{в}})$ и $d(H_{\text{с}})$.

Для анализа использовались среднегодовые значения температуры воздуха, среднегодовые значения температуры почвогрунтов и высота снежного покрова в феврале по станциям.

Вклады каждого из двух факторов в общую дисперсию среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 160 см показаны в виде диаграмм на карте (рис. 2.10) в местах расположения станций.

Почти на всей Европейской территории Российской Федерации, за исключением Самары, межгодовые изменения среднегодовой температуры почвогрунтов за 1965 – 2006 гг. на глубине 160 см в большей мере (от 20 до 50%) определяются изменениями температуры воздуха (красные столбики диаграмм), в тех же местах изменения снежного покрова определяют не более 10% изменчивости (зеленые столбики диаграмм).

В Среднем Поволжье, на Урале и в Сибири (кроме Якутска, Владивостока и станции Ключи на Камчатке) межгодовые изменения среднегодовой температуры почвогрунтов за 1965 – 2006 гг. в большей мере – от 10 до 50% – определяются изменениями высоты снежного покрова, а температура воздуха там же определяет только от 0 до 10% изменчивости температуры почвогрунтов.

Аналогичные оценки вклада каждого из двух факторов были получены также для температуры на глубинах 80 и 320 см. Построенные карты (не приводятся) показали, что на глубине 80 см влияние каждого из двух факторов более заметно, их вклады в общую изменчивость температуры почвогрунтов больше, чем на глубине 160 см, но основные пространственные закономерности те же: за 1965 – 2006 гг. в Европе многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 80 см в большей мере определяются изменениями температуры воздуха, а в Азии – изменениями высоты снежного покрова.

На глубину 320 см влияние поверхностных метеорологических условий проникает в очень ослабленном виде и очень неравномерно по территории Российской Федерации. Всего на глубине 320 см примерно на одной четверти от общего количества станций температура почвогрунтов не зависит ни от температуры воздуха, ни от высоты снежного покрова (корреляции статистически незначимые). По остальным станциям на глубине 320 см сохраняются только главные пространственные особенности. На Восточно-Европейской равнине на глубине 320 см, так же как на вышележащих глубинах, многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов в большей мере определяются изменениями температуры воздуха. В тех же местах изменения снежного покрова в меньшей мере сказываются на изменениях температуры почвогрунтов. В Сибири многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 320 см

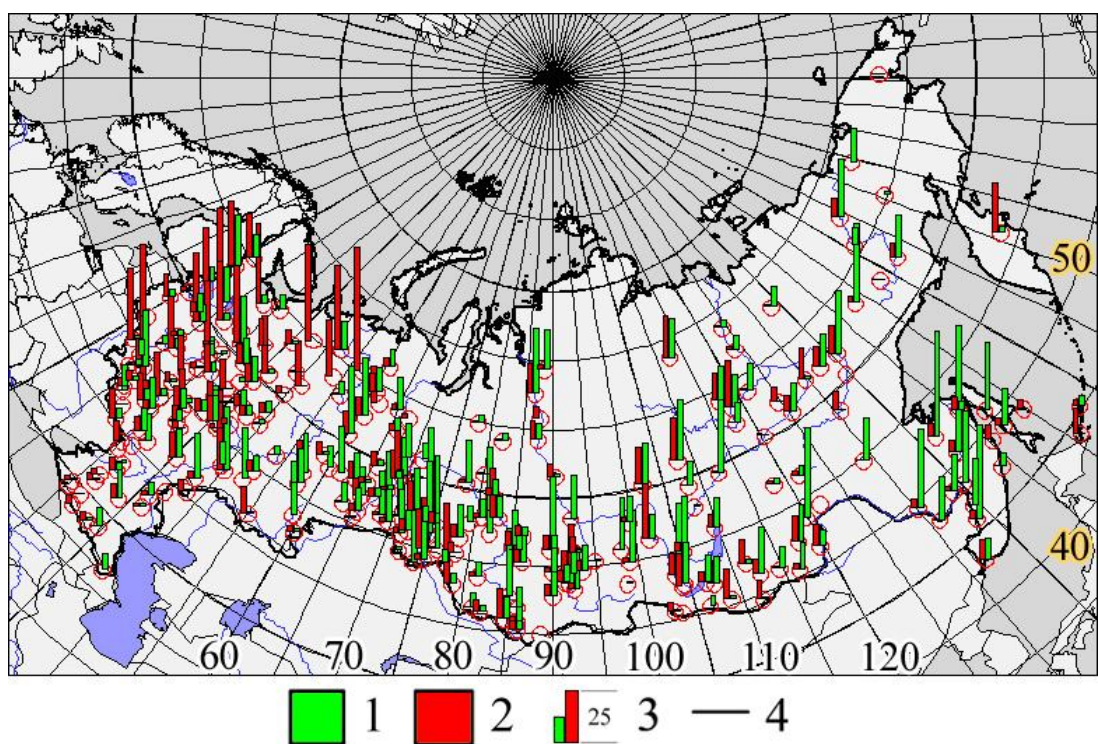


Рис. 2.10. Вклад (в %) изменений среднегодовой температуры воздуха и высоты снежного покрова за 1965 – 2006 гг. в многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 160 см: 1 – вклад (в %) высоты снежного покрова в многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов; 2 – вклад (в %) среднегодовой температуры воздуха в многолетние изменения среднегодовой температуры почвогрунтов; 3 – масштаб 25% вклада исследуемого фактора; 4 – граница России

в большей мере определяются изменениями высоты снежного покрова. Исключением являются станции Киренск и Якутск на Лене, станции Братск на Ангаре и Леуши в Западной Сибири.

Станции, на которых на глубину 320 см не доходит влияние многолетних изменений поверхностных метеорологических условий, встречаются в любых регионах Российской Федерации как исключение.

Для примера в табл. 2.1 показаны количественные оценки вкладов температуры воздуха и высоты снежного покрова для нескольких европейских станций, а в табл. 2.2 – для выборочных станций Сибири. В обеих таблицах приведены оценки по станциям со статистически достоверными положительными трендами температуры почвогрунтов.

Сравнение вклада различных факторов в общую дисперсию температуры почвогрунтов на глубине 160 см (табл. 2.1) показывает, что за 1965 – 2006 гг. на станциях Восточно-Европейской равнины температура воздуха составляет от 23 до 46% вклада в общую дисперсию, а роль снежного покрова в этих случаях минимальна (от 0,4 до 8,0%). На рис. 2.11 показаны многолетние изменения температуры

Таблица 2.1

Оценки вклада среднегодовой температуры воздуха
и высоты снежного покрова в общую дисперсию температуры
почвогрунтов на глубине 160 см по данным за 1965 – 2006 гг.
Станции Восточно-Европейской равнины

Станция	Координаты		Вклад в общую дисперсию, %	
	долгота	широта	температура воздуха годовая	высота снежного покрова
Сортавала	30,7	61,7	37,5	8,0
Вытегра	36,5	61,0	29,3	4,4
Онега	38,1	63,9	39,3	5,7
Кострома	40,9	57,8	23,5	6,3
Койнас	47,7	64,8	46,2	0,4

Таблица 2.2

Оценки вклада среднегодовой температуры воздуха
и высоты снежного покрова в общую дисперсию температуры
почвогрунтов на глубине 160 см по данным за 1965 – 2006 гг.
Станции Сибири

Станция	Координаты		Вклад в общую дисперсию, %	
	долгота	широта	температура воздуха годовая	высота снежного покрова
Нижний Тагил	60,1	57,9	0,7	13,5
Тара	74,4	57	5,0	49,6
Купино	77,3	54,4	4,1	11,2
Александровское	77,9	60,4	0,0	21,4
Северное	78,4	56,4	2,9	13,0
Пудино	79,2	57,6	0,1	9,3
Нижнеудинск	99,0	54,9	4,7	32,9
Бохан	103,8	53,2	4,7	30,0
Жигалово	105,2	54,8	0,9	28,6
Непа	108,2	59,3	1,2	14,3
Могоча	119,8	53,7	3,9	47,7

почвогрунтов и высоты снежного покрова, а также их тренды за 1965 – 2005 гг. на станции Онега. Тренд температуры почвогрунтов статистически достоверен с вероятностью выше 95%.

Рис. 2.11 наглядно демонстрирует приведенные в табл. 2.1 оценки. Видно, что на станции Онега изменения температуры почвогрунтов, хотя и с меньшей амплитудой, но согласуются с изменениями температуры воздуха, при этом с изменениями высоты снежного покрова согласования не отмечаются.

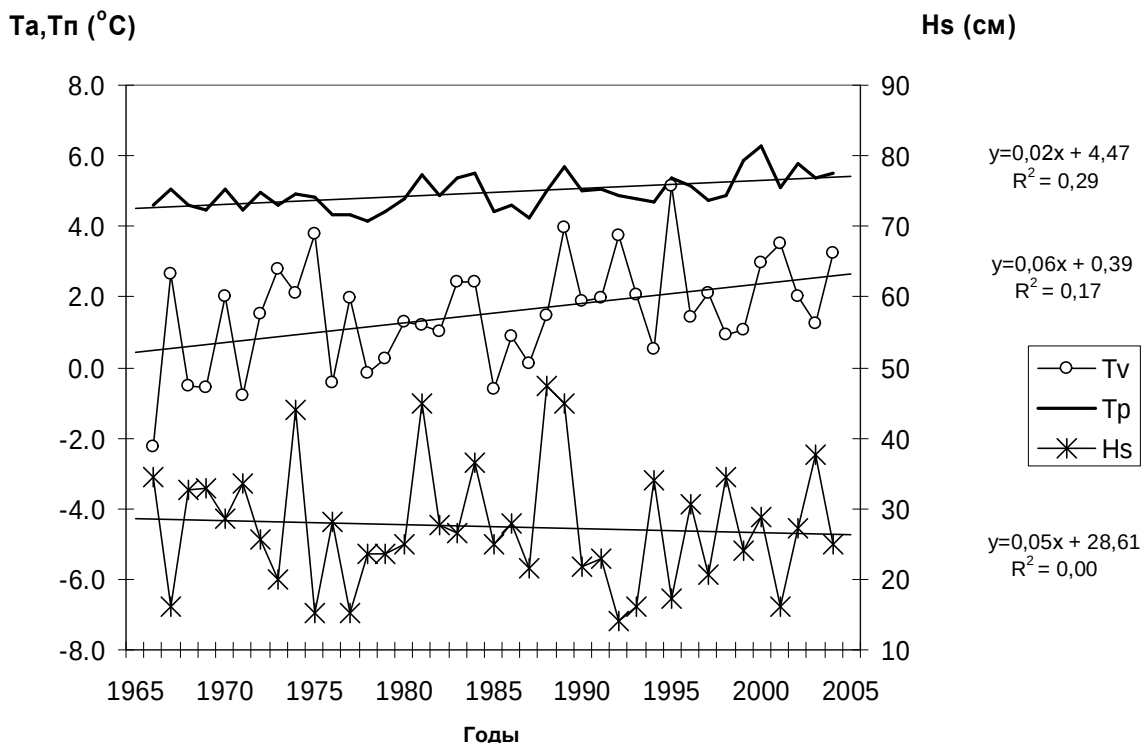


Рис. 2.11. Многолетний ход среднегодовых значений температуры воздуха (T_a), температуры почвогрунтов на глубине 160 см (T_p) и высоты снежного покрова (H_s) на станции Онега (Восточно - Европейская равнина)

Из табл. 2.2 следует, что за 1965 – 2006 гг. для станций Сибири более существенным является воздействие снежного покрова на среднегодовую температуру почвогрунтов. Вклад высоты снежного покрова в изменения температуры почвогрунтов составляет от 9,3 до 49,6% от общей изменчивости. А вклад среднегодовой температуры воздуха в общую изменчивость температуры почвогрунтов на станциях Сибири не превышает 5%, что хорошо согласуется с результатами корреляционного анализа, приведенными ранее в разделе 2.4. На более длительном многолетнем интервале, как показано в разделе 2.1 на примере двух длиннорядных станций, значение трендовой составляющей температуры почвогрунтов существенно зависит от трендовой составляющей температуры воздуха. Многолетние изменения температуры воздуха и температуры почвогрунтов складываются из трендовых составляющих и короткопериодных межгодовых изменений. На интервале четырех последних десятилетий межгодовые изменения температуры почвогрунтов Сибири оказались в большей мере зависимыми от короткопериодных межгодовых изменений высоты снежного покрова, а на интервале более 70 лет видно, что тренды температуры почвогрунтов следуют за трендами температуры воздуха.

Различия описанных зависимостей на Европейской территории России и в Сибири объясняются сезонными различиями климата в этих регионах. Климат сибирских станций отличается от европейских станций холодными продолжительными зимами. Хорошо известно, что влияние снежного покрова на температурный режим подстилающих пород зависит от его мощности [66], снег оказывает как охлаждающее, так и обогревающее влияние на почвогрунты. Полученный результат хорошо согласуется с выводом А.И. Воейкова о том, что обогревающее влияние снега превосходит охлаждающее и оно тем больше, чем продолжительнее лежит снежный покров при морозах [29, 111]. Возможно, в условиях холодных сибирских зим снежная теплоизоляция почвогрунтов от чрезмерного зимнего выхолаживания имеет большее значение для среднегодовой температуры почвогрунтов, чем снежная теплоизоляция на европейских станциях с мягкими зимами. Поэтому на сибирских станциях среднегодовая температура почвогрунтов в большей мере зависит от изменений высоты снежного покрова и в меньшей мере – от изменений температуры воздуха, а на европейских станциях – наоборот, изменения температуры воздуха являются определяющими в изменениях температуры почвогрунтов.

Далее рассматривался совместный вклад двух факторов в общую дисперсию среднегодовой температуры почвогрунтов за 1965 – 2006 гг. Он определялся как сумма $d(T_v)$ и $d(H_c)$ и представлен на карте рис. 2.12.

Из рис 2.12 видно, что совместное влияние температуры воздуха и высоты снежного покрова объясняет от 20 до 50% изменчивости температуры почвогрунтов почти на всей территории России, за исключением северной части Дальнего Востока. Там вклад двух факторов меньше и объясняет от 10 до 20% изменчивости температуры почвогрунтов.

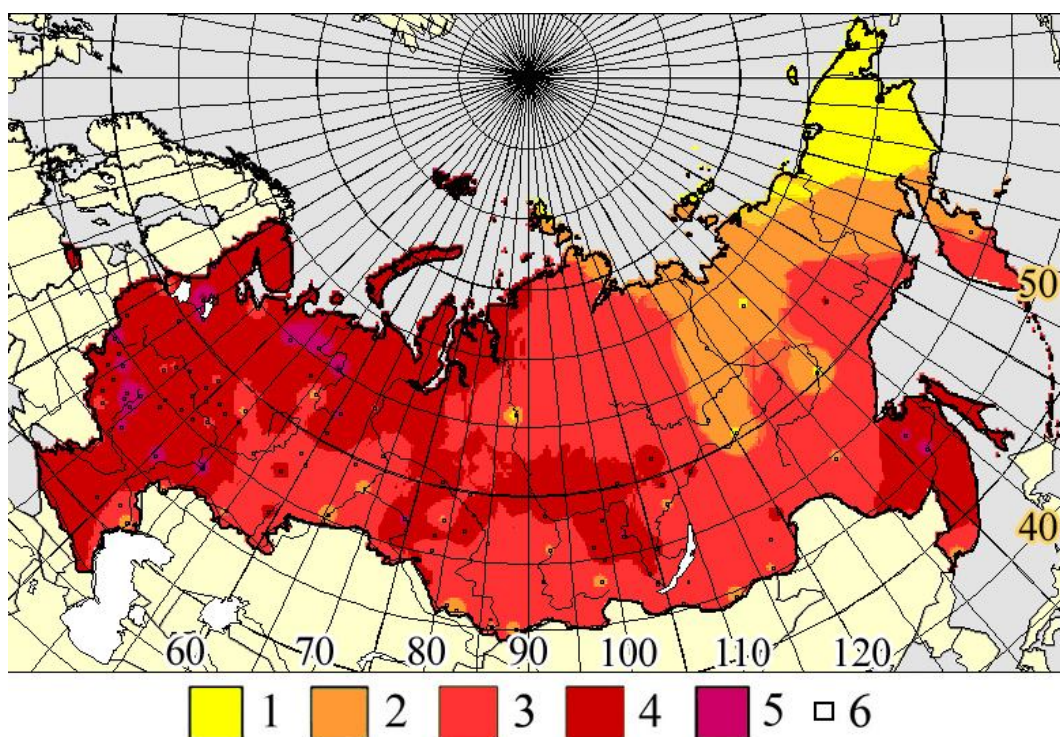


Рис. 2.12. Суммарный вклад (в %) в уравнение множественной регрессии многолетних изменений среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 160 см от среднегодовой температуры воздуха (T_a) и высоты снежного покрова (H_s): 1 – $10 \leq t < 20$; 2 – $20 \leq t < 30$; 3 – $30 \leq t < 40$; 4 – $40 \leq t < 50$; 5 – $50 \leq t$; 6 – метеостанции

Выводы

1. Наблюдения за 116 лет по станции Иркутск и за 77 лет станции Красноярск показали высокую положительную корреляцию между температурой почвогрунтов на глубине 320 см и температурой воздуха. За указанные интервалы лет в Иркутске повышение температуры почвогрунтов составило $3,5^\circ\text{C}$, а в Красноярске – $2,5^\circ\text{C}$.

2. За последние 15 лет площадь регионов с климатическими условиями, благоприятными (по индексу В.П. Нечаева $I < -1$) для существования мерзлых почвогрунтов (включая островную и прерывистую мерзлоту), сократилась примерно на 30 %, по сравнению с нормой, и почти на 50 % сократилась площадь с условиями, благоприятными ($I < -2$) для сохранения сплошных мерзлых почвогрунтов (без островной и прерывистой мерзлоты) на территории России.

3. По сдвигу фаз годового хода температуры почвогрунтов на двух уровнях обнаружены особые свойства почвогрунтов в зоне мерзлоты, при которых ослаблено распространение изменений температуры из вышележащих слоев в нижележащие.

4. На основе анализа корреляций по данным инструментальных наблюдений за последние 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 (северной половины Восточной Сибири);

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

в) 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.

5. Количественные оценки по уравнению регрессии за 1965 – 2006 гг. 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%). Отопляющее действие снежного покрова здесь практически не проявляется;

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

ГЛАВА 3. ТЕМПЕРАТУРА ПОЧВОГРУНТОВ В СЛОЕ 80 – 320 см КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

3.1. Тенденции изменения среднегодовой температуры почвогрунтов на глубинах в последние десятилетия

Изменение среднегодовой температуры почвогрунтов на глубинах

Главной характеристикой термического состояния мерзлоты является среднегодовая температура почвогрунтов, а ее многолетние изменения могут служить характеристикой изменений состояния мерзлоты. Многолетнее изменение термического состояния почвогрунтов оценивалось величиной линейного тренда среднегодовой температуры за 1965 – 2006 гг. в пересчете на 10 лет ($^{\circ}\text{C}/10$ лет).

На рис. 3.1 – 3.3 показано пространственное распределение трендов температуры на различных глубинах.

На рис. 3.1 выделены станции, на которых достоверность тренда не менее 95%. На глубине 80 см положительные тренды температуры почвогрунтов охватывают всю территорию России. Повышенные значения трендов $0,2 - 0,6$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет наблюдаются на севере ЕТР, в Сибири и на Дальнем Востоке. Статистически достоверные положительные тренды охватывают всю южную половину Сибири (южнее 62° с.ш.) и долины рек Лена и Вилюй. В этих районах преобладают тренды $0,3 - 0,6$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет.

На глубине 160 см (рис. 3.2) также по всей России преобладают положительные тренды, но область повышенных значений ($>0,2$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет) сужается по долготе и охватывает в основном только территорию Сибири от Урала до р. Лена. Статистически достоверное потепление ($>0,3$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет) также наблюдается в южной половине Сибири и на реках Лена и Вилюй.

На глубине 320 см (рис. 3.3), как и в вышележащих слоях, тренды преимущественно положительные, область повышенных значений ($>0,2$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет) еще более сужается. Значимые значения трендов $>0,3$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет наблюдаются в основном на группе станций в среднем течении Оби и Иртыша и вблизи меридианов $100 - 105^{\circ}$ с.ш., а также на Вилюе.

Из сопоставления трех карт (рис. 3.1 – 3.3) можно сделать вывод, что потепление климата проникает в почвогрунты с ослаблением по глубине. Наибольшие и значимые потепления почвогрунтов, проникающие до нижней анализируемой глубины 320 см, наблюдаются в центральной и южной частях Сибири от Оби до Лены. Самое существенное потепление на глубине 320 см со значимыми трендами от $0,4$ до $0,6$ $^{\circ}\text{C}/10$ лет наблюдается в районе Ангары и на Вилюе.

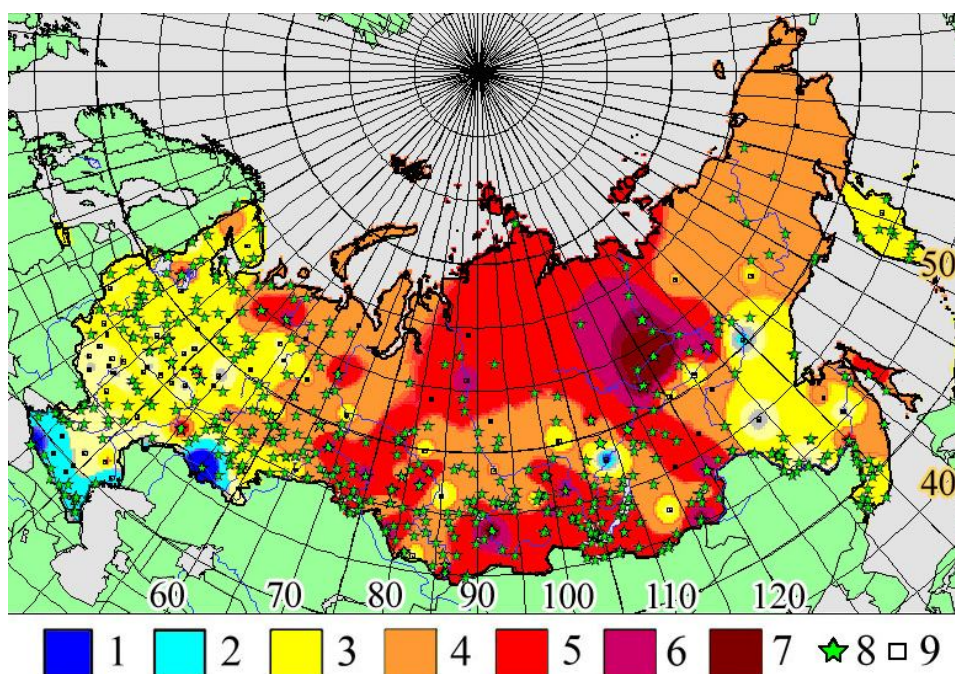


Рис. 3.1. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 80 см за 1965 – 2006 гг.: 1 – $-0,3 \leq k < -0,1$; 2 – $-0,1 \leq k < 0$; 3 – $0 < k \leq 0,1$; 4 – $0,1 < k \leq 0,2$; 5 – $0,2 < k \leq 0,3$; 6 – $0,3 < k \leq 0,4$; 7 – $0,4 < k \leq 0,6$; 8 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 9 – станции с незначимым трендом

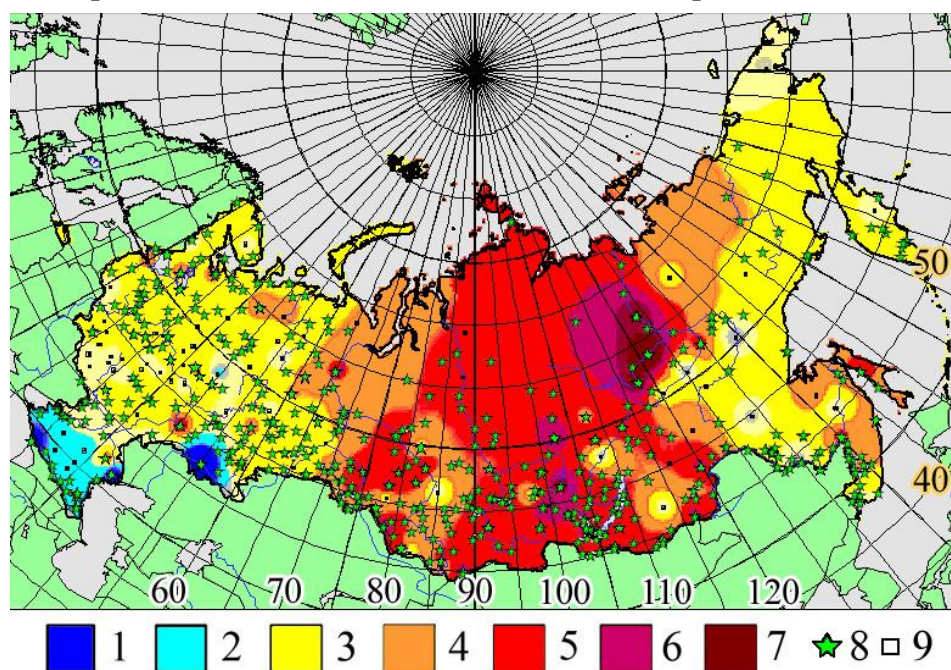


Рис. 3.2. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 160 см за 1965 – 2006 гг.: 1 – $-0,3 \leq k < -0,1$; 2 – $-0,1 \leq k < 0$; 3 – $0 < k \leq 0,1$; 4 – $0,1 < k \leq 0,2$; 5 – $0,2 < k \leq 0,3$; 6 – $0,3 < k \leq 0,4$; 7 – $0,4 < k \leq 0,6$; 8 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 9 – станции с незначимым трендом

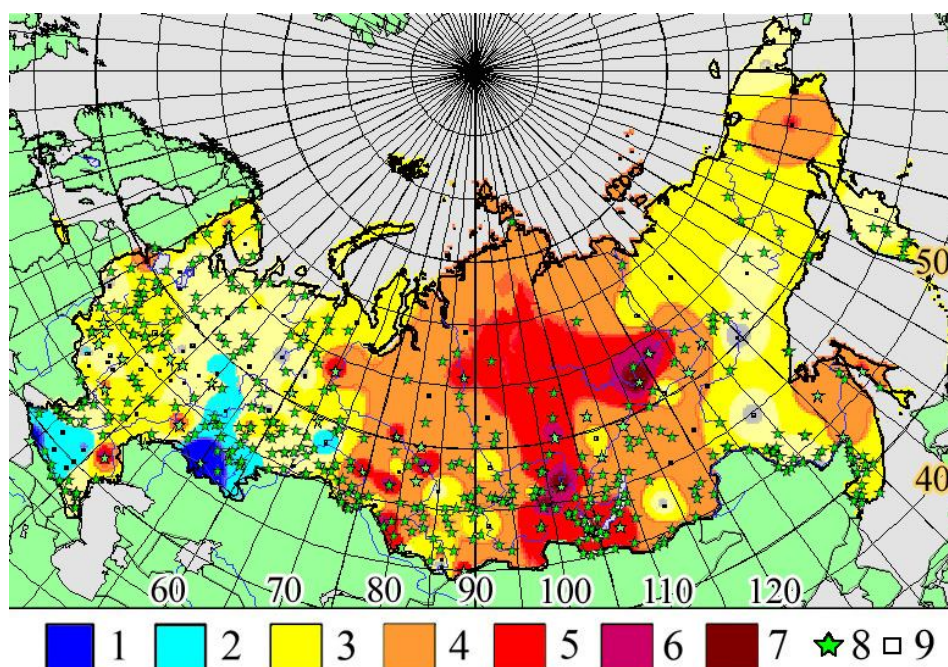


Рис. 3.3. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 320 см за 1965 – 2006 гг.: 1 – $-0,3 \leq k < -0,1$; 2 – $-0,1 \leq k < 0$; 3 – $0 < k \leq 0,1$; 4 – $0,1 < k \leq 0,2$; 5 – $0,2 < k \leq 0,3$; 6 – $0,3 < k \leq 0,4$; 7 – $0,4 < k \leq 0,6$; 8 – станции с достоверностью тренда $\geq 95\%$; 9 – станции с незначимым трендом

В указанном обширном районе южной половины Сибири расположены почти все крупные сибирские промышленные центры и проживает почти все население Сибири. В южной части этого же района состояние многолетнемерзлых почвогрунтов наименее устойчиво и поэтому, возможно, более чувствительно к потеплению климата. Потепление создает предпосылки для протаивания верхних многолетнемерзлых почвогрунтов, а также для негативных последствий в инфраструктуре и хозяйственной деятельности человека. Деградация мерзлоты является серьезной экологической проблемой Сибири.

Анализ трендов температуры почвогрунтов за период 1965 – 2006 гг. 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 различия, возможно, связаны с влиянием снежного покрова и с различиями в теплофизических свойствах почвогрунтов.

3.2. Изменение максимума и минимума годового хода температуры на глубинах за последние три десятилетия

Амплитуда многолетних колебаний температуры почвогрунтов значительно меньше амплитуды годовых колебаний. Ниже слоя нулевых годовых амплитуд температура изменяется во времени крайне медленно [66]. Поэтому значение температуры почвогрунтов на глубине полного затухания годового хода является важнейшим показателем условий для сохранения мерзлоты. Деградация мерзлоты не происходит, если минимальные и максимальные за год значения сходятся в области отрицательных температур. В этом разделе описаны оценки экстремальных значений годового хода температуры по результатам ежедневных наблюдений на метеорологических станциях на глубинах до 320 см и приведена экстраполяция некоторых закономерностей на большие глубины.

При периодических колебаниях температуры на поверхности почвы в течение длительного промежутка времени в грунте также устанавливаются колебания температуры с тем же периодом, причем амплитуда этих колебаний экспоненциально убывает с глубиной, а фаза колебаний с глубиной запаздывает. Величина сдвига фаз колебаний во времени прямо пропорциональна глубине. Глубина проникновения колебаний в грунт зависит от периода этих колебаний. Затухание колебаний происходит с глубиной тем быстрее, чем меньше их период [66]. Сдвиг фаз колебаний на разных глубинах уже рассматривался в разделе 2.3, теперь попытаемся оценить изменение по глубине амплитуды годового хода температуры почвогрунтов.

Анализ проводился по семи районам зоны многолетней мерзлоты (рис.3.4). 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 Российской Федерации (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).

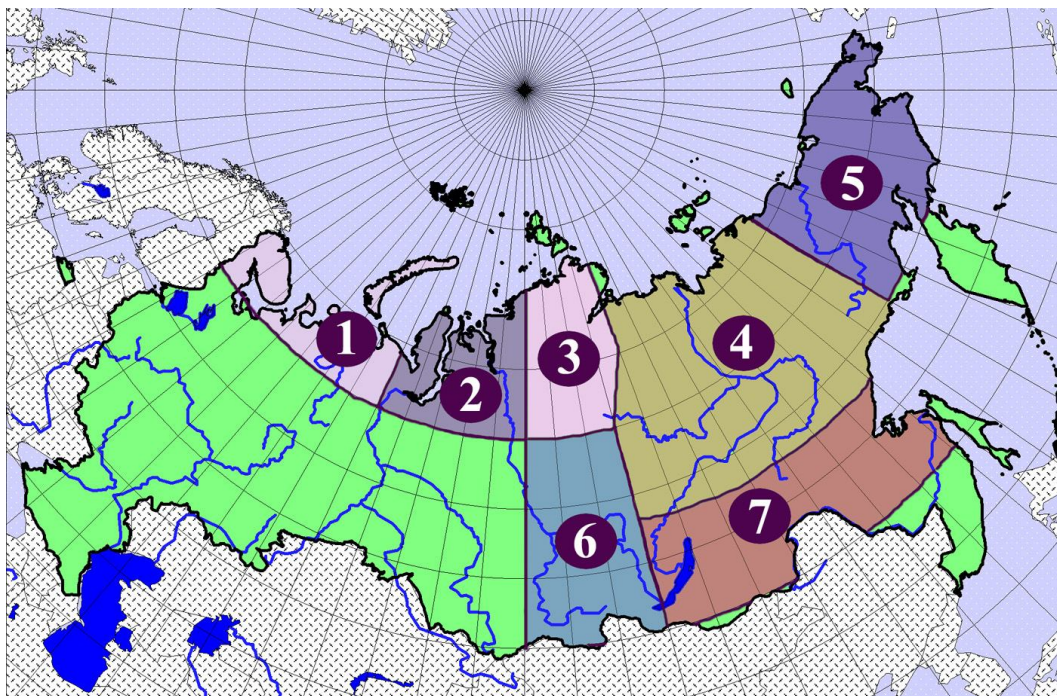


Рис. 3.4. Районы в зоне мерзлоты: Европейский Север Российской Федерации (1), север Западной Сибири (2), северо-запад Восточной Сибири (3), Якутия (4), север Дальнего Востока (5), юго-запад Восточной Сибири (6), Забайкалье и Приамурье (7)

Экстремумы годового хода определялись по среднему годовому ходу за пятилетие, осредненному по всем станциям района. Известно, что пространственное распределение станций в России неравномерно, 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 1977 – 1981 гг. и отдельно за 2001 – 2005 гг. на глубинах 80, 160, 240 и 320 см. Два пятилетия выбраны для сравнения.

На каждой глубине среднесуточные значения описывают годовой ход температуры в районе по двум выборкам лет. 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 обобщенным значениям определены минимум и максимум годового хода среднесуточной температуры на каждой глу-

бине отдельно по каждой выборке. Вычислены также среднегодовые значения температуры почвогрунтов на глубинах.

В табл. 3.1 – 3.7 для каждого района по двум интервалам лет показаны вычисленные значения на глубинах 80, 160, 240 и 320 см. На графиках (рис. 3.5 – 3.11) точками показаны значения температур на отдельных глубинах, а кривые на графиках – аппроксимация логарифмической функцией изменений температур по глубине до 320 см и экстраполяция на большие глубины. Как видно из графиков (рис. 3.5 – 3.11), на всех глубинах, включая 320 см, минимальная и максимальная температуры различны, т.е. амплитуда годового хода на всех рассмотренных глубинах не равна нулю. Это означает, что 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.

Рассмотрим далее особенности по районам.

Европейский Север

Из табл. 3.1 видно, что на Европейском Севере минимальные и максимальные за год значения температуры на всех глубинах в последнее пятилетие выше соответствующих значений в 1977 – 1981 гг. Среднегодовые значения за три десятилетия увеличились более чем на 1°C на всех глубинах 80 – 320 см.

Таблица 3.1

Минимальное и максимальное значение среднего годового хода суточной температуры почвогрунтов на глубинах и среднегодовое ее значение (°C) по двум выборкам лет. Европейский Север Российской Федерации

Глубина, см	1977 – 1981 гг.			Глубина, см	2001 – 2005 гг.		
	Min	Max	Среднее		Min	Max	Среднее
80	-2,5	9,7	2,0	80	-1,1	10,9	3,2
160	-0,7	7,0	2,0	160	0,5	8,1	3,3
240	1,1	5,1	2,2	240	2,0	6,0	3,3
320	2,2	3,6	2,1	320	2,8	5,0	3,2

Рис. 3.5 наглядно демонстрирует, что минимальные и максимальные значения температуры на всех глубинах в последнее пятилетие выше соответствующих значений в 1977 – 1981 гг.

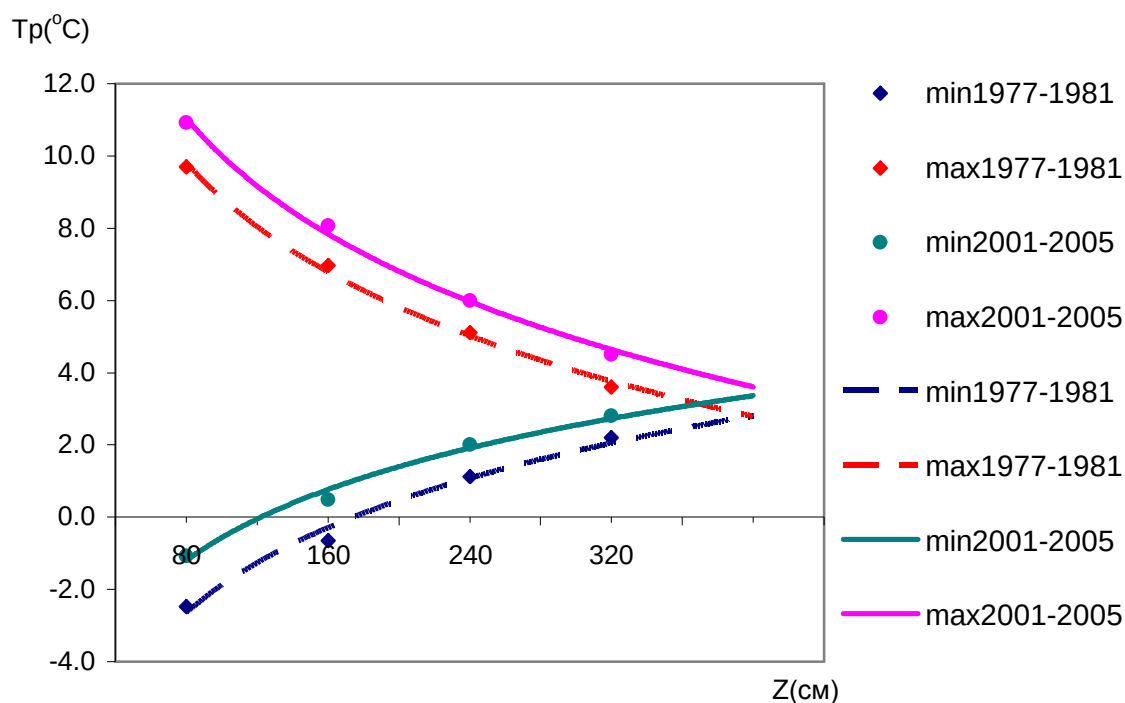


Рис. 3.5. Изменение годового максимума и минимума температуры почвогрунтов на глубинах (Z) по средним данным за 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг. Европейский Север Российской Федерации

Потепление почвогрунтов произошло на всех глубинах как в теплый, так и в холодный сезон. Слой, в нижнем основании которого полностью затухают колебания годового хода температуры и минимальные значения сходятся с максимальными, называется деятельным слоем [66]. На рис. 3.5 по данным экстраполяции видно, что кривые минимальных и максимальных температур в обеих выборках должны сойтись на некоторой глубине в области положительных температур, но глубина деятельного слоя превосходит глубины наблюдений и нет возможности достоверно определить ее путем экстраполяции. По данным [118], глубина проникновения годового хода составляет примерно 25 м в северных широтах и около 10 м – в южных широтах. Предполагаемая сходимост минимальных и максимальных за год температур в области положительных значений очень важна для оценки состояния почвогрунтов в зоне мерзлоты.

Известно [66], что необходимым условием существования многолетней мерзлоты являются отрицательные значения температуры у подошвы деятельного слоя, а полученные выше положительные значения показывают, что на севере ЕТР на рассмотренных глубинах сложились неблагоприятные условия для дальнейшего сохранения мерзлых почвогрунтов. Известно, что до 1970-х гг. многолетняя мерзлота была на севере ЕТР. Новые данные показывают, что в последние

тридцать лет многолетняя мерзлота там либо находится в состоянии деградации, либо уже деградировала. По данным [88, 109], в некоторых местах в рассматриваемом районе еще сохраняются островки мерзлоты.

В сезонных изменениях температуры на глубинах важным моментом является переход температуры через 0°C . Если станция лежит в зоне мерзлоты, то на графиках переход кривых максимальной температуры через ноль на пересечении с осью глубины показывает глубину протаивания почвогрунтов в теплый период. Вне зоны мерзлоты переход кривых минимальной температуры через ноль показывает глубину промерзания ($T_p=0^{\circ}\text{C}$) почвогрунтов в холодный период. Рис. 3.5 показывает, что на севере ЕТР зимнее промерзание в 1977 – 1981 гг. доходило до 180 см, а в последние годы достигает только 120 см. Ниже 320 см температура почвогрунтов на Европейском Севере остается положительной круглый год.

Север Западной Сибири

На севере Западной Сибири температура почвогрунтов на глубинах за последние три десятилетия (табл. 3.2) повысилась на всех глубинах на $0,3 - 0,4^{\circ}\text{C}$, среднегодовые значения близки к нулю, но остаются отрицательными.

Таблица 3.2

Минимальное и максимальное значение среднего годового хода суточной температуры почвогрунтов на глубинах и среднегодовое ее значение ($^{\circ}\text{C}$) по двум выборкам лет. Север Западной Сибири

Глубина, см	1977 – 1981 гг.			Глубина, см	2001 – 2005 гг.		
	Min	Max	Среднее		Min	Max	Среднее
80	-4,5	4,8	-1,4	80	-4,0	6,3	-1,1
160	-3,0	2,7	-1,3	160	-2,2	3,3	-0,9
240	-1,8	1,0	-1,1	240	-1,4	1,8	-0,8
320	-0,8	-0,2	-0,7	320	-0,7	0,4	-0,6

Минимальные и максимальные значения сходятся в области отрицательных значений (рис. 3.6).

Летнее протаивание в 1977 – 1981 гг. доходило примерно до 340 см, а в последнее пятилетие увеличилось еще примерно на 20 см. Однако эти глубины находятся ниже 320 см, т.е. они определены с использованием экстраполяции и, следовательно, весьма приблизительные. Отрицательные среднегодовые значения температуры почвогрунтов свидетельствуют о сохранении многолетней мерзлоты на севере За-

падной Сибири. Более подробно изменения глубины протаивания и связанные с ним некоторые возможные последствия рассмотрены в главе 4.

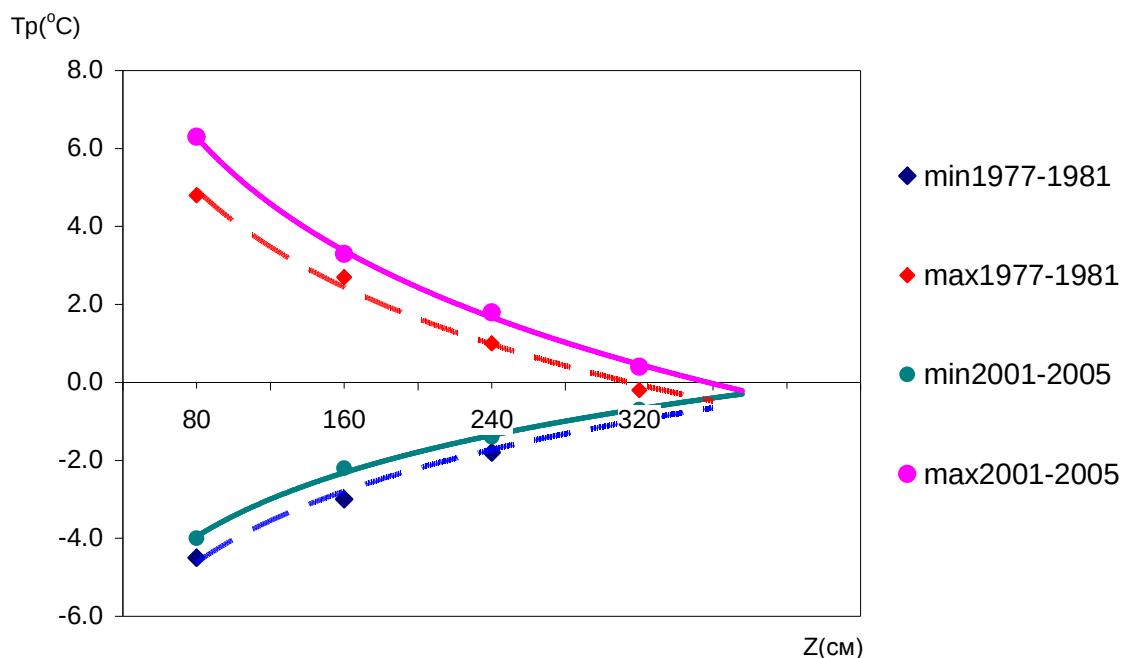


Рис. 3.6. Изменение годового максимума и минимума температуры почвогрунтов на глубинах (Z) по средним данным за 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг. Север Западной Сибири

Северо-запад Восточной Сибири (без Якутии)

Восточная Сибирь очень протяженная по широте и долготе, далее она рассматривается по частям. Отдельно рассматривается Якутия и два района в западной части Восточной Сибири, называемые далее северо-запад и юго-запад Восточной Сибири (без Якутии). На северо-западе Восточной Сибири произошло повышение среднегодовых температур почвогрунтов на всех глубинах примерно на 1°С (табл. 3.3, рис. 3.7).

Таблица 3.3

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

Северо-запад Восточной Сибири (без Якутии)

Глубина, см	1977 – 1981 гг.			Глубина, см	2001 – 2005 гг.		
	Min	Max	Среднее		Min	Max	Среднее
80	-7,9	3,7	-2,1	80	-4,3	7,6	-0,9
160	-6,7	1,1	-1,7	160	-2,8	4,1	-0,8
240	-5,2	-0,6	-2,0	240	-2,0	2,5	-0,8
320	-4,2	-1,9	-1,8	320	-1,8	1,5	-0,7

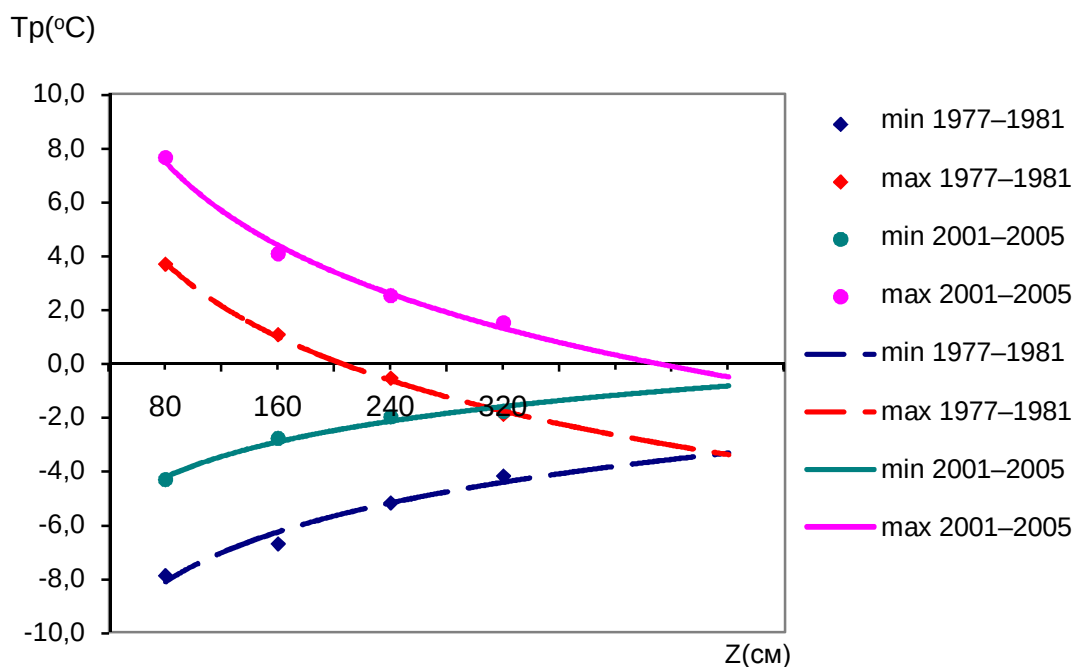


Рис. 3.7. Изменение годового максимума и минимума температуры почвогрунтов на глубинах (Z) по средним данным за 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг. Северозапад Восточной Сибири (без Якутии)

На всех глубинах среднегодовые значения были и остаются отрицательными, хотя в последнее пятилетие они приблизились к нулю. Условия, благоприятные для многолетней мерзлоты, сохраняются. Если раньше летнее протаивание почвогрунтов происходило до глубин 200 см, то в последнее пятилетие протаивание до глубины более 320 см.

Якутия

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°C, однако среднегодовые значения температуры были и остались отрицательными на глубинах от 80 до 320 см. В Якутии условия для устойчивой многолетней мерзлоты сохраняются.

Таблица 3.4

Минимальное и максимальное значение среднего годового хода суточной температуры почвогрунтов на глубинах и среднегодовое ее значение (°C) 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	0	-2,3	240	-5,1	1,0	-1,5
320	-4,8	-1,5	-2,5	320	-5,2	-0,5	-1,5

Аппроксимация и экстраполяция логарифмической функцией изменений температур по глубине показывает, что летом положительные значения температуры в 1977 – 1981 гг. достигали глубины примерно 240 см, а в последние годы протаивание достигало 280 см.

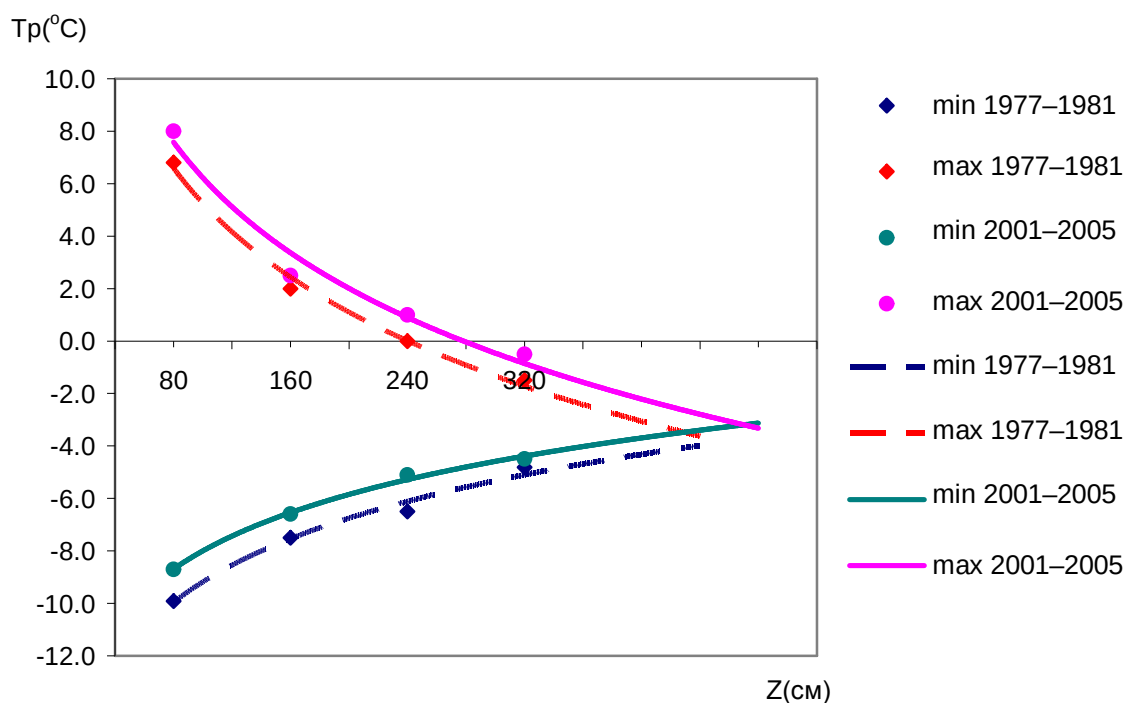


Рис. 3.8. Изменение годового максимума и минимума температур почвогрунтов на глубинах (Z) по средним данным за 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг. Якутия

Север Дальнего Востока

На севере Дальнего Востока минимальные и максимальные температуры за прошедшие три десятилетия повысились на всех глубинах.

Таблица 3.5

Минимальное и максимальное значение среднего годового хода суточной температуры почвогрунтов на глубинах и среднегодовое ее значение (°C) по двум выборкам лет. Север Дальнего Востока

Глубина, см	1977 – 1981 гг.			Глубина, см	2001 – 2005 гг.		
	Min	Max	Среднее		Min	Max	Среднее
80	-13,1	4,9	-3,6	80	-11,1	6,6	-2,8
160	-10,6	0,8	-3,6	160	-8,6	2,7	-2,7
240	-9,0	-1,4	-3,7	240	-7,0	0,2	-2,8
320	-8,0	-2,9	-3,8	320	-6,5	-1,3	-2,3

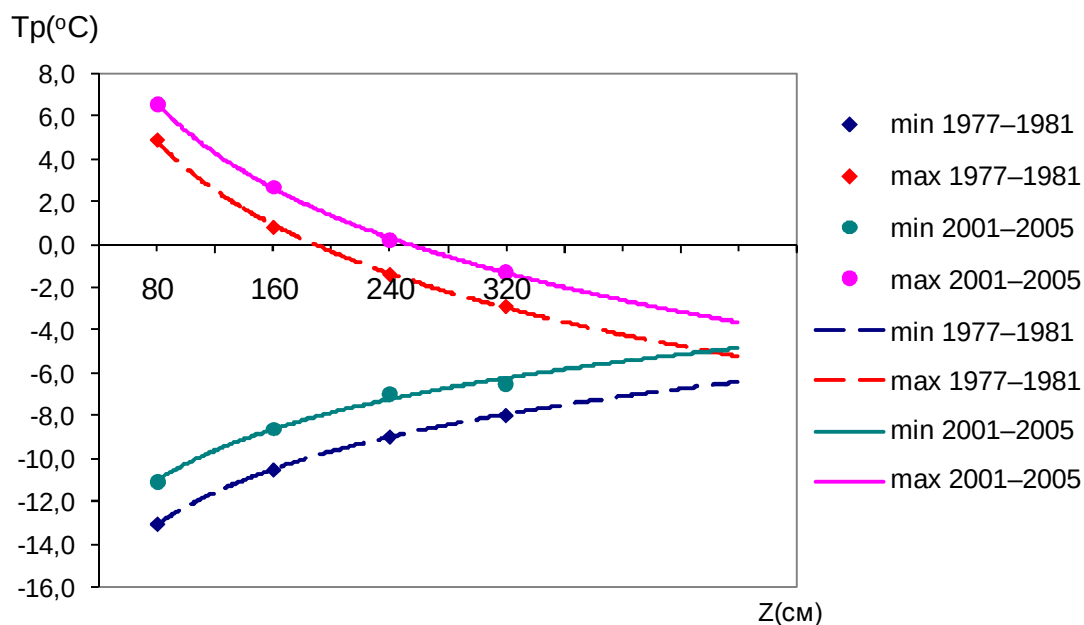


Рис. 3.9. Изменение годового максимума и минимума температуры почвогрунтов на глубинах (Z) по средним данным за 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг. Север Дальнего Востока

По данным экстраполяции сходимость минимальных и максимальных температур должна произойти в области отрицательных температур, как по данным за 1977 – 1981 гг., так и по данным за 2001 – 2005 гг. Это показывает сохранение благоприятных условий для существования мерзлоты в этом районе.

Юго-запад Восточной Сибири

На юго-западе Восточной Сибири за последние три десятилетия на всех глубинах 80 – 320 см произошло повышение как минимальных, так и максимальных за год температур почвогрунтов, причем максимальные температуры повысились сильнее, чем минимальные, амплитуда годового хода увеличилась. Слой сезонного промерзания почти не изменился (уменьшился не более чем на 20 см). Среднегодовые значения повысились примерно на 1,3°C.

Таблица 3.6

Минимальное и максимальное значение среднего годового хода суточной температуры почвогрунтов на глубинах и среднегодовое ее значение (°C) по двум выборкам лет на юго-западе Восточной Сибири

Глубина, см	1977 – 1981 гг.			Глубина, см	2001 – 2005 гг.		
	Min	Max	Среднее		Min	Max	Среднее
80	-3,6	12,7	2,9	80	-3,0	14,7	4,1
160	-0,8	9,3	3,0	160	-0,3	11,4	4,2
240	0,3	7,0	3,0	240	1,0	8,3	4,3
320	2,0	5,1	3,0	320	2,0	6,6	4,4

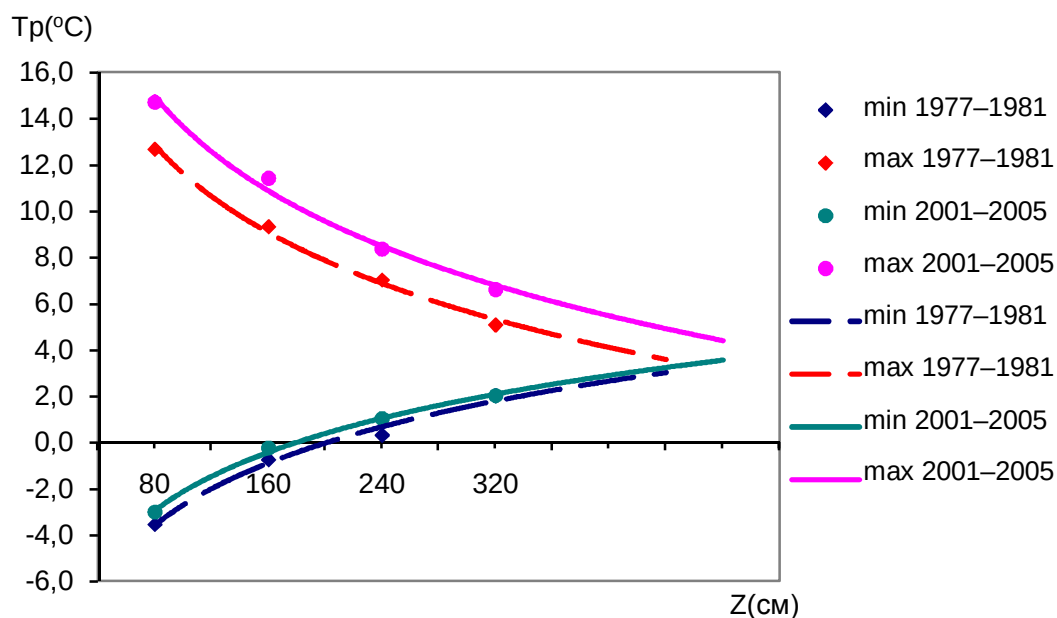


Рис. 3.10. Изменение годового максимума и минимума температуры почвогрунтов на глубинах (Z) по средним данным за 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг. Юго-запад Восточной Сибири

Минимальные и максимальные значения сходятся в области положительных температур по данным обеих выборок. Это свидетельствует о том, что на юго-западе Восточной Сибири условия для мерзлоты неблагоприятны. Видимо, мерзлота там находится в состоянии деградации. По публикациям [66, 88] этот район относится к зонам прерывистой и островной мерзлоты.

Забайкалье и Приамурье

В Забайкалье и Приамурье за последние три десятилетия на всех глубинах 80 – 320 см произошло повышение как минимальных, так и максимальных за год температур почвогрунтов. Среднегодовые значения повысились примерно на 1,3 °C.

Таблица 3.7

Минимальное и максимальное значение среднего годового хода суточной температуры почвогрунтов на глубинах и среднегодовое ее значение (°C) по двум выборкам лет в Забайкалье–Приамурье

1977 – 1981 гг.				2001 – 2005 гг.			
Глубина, см	Min	Max	Среднее	Глубина, см	Min	Max	Среднее
80	-7,8	10,8	1,3	80	-5,9	12,6	2,6
160	-4,1	7,3	1,3	160	-2,5	8,8	2,7
240	-2,6	5,5	1,4	240	-1,6	6,6	2,7
320	-1,4	4,2	1,4	320	-0,6	5,2	2,8

Среднегодовые значения положительные, сходимость минимальных и максимальных значений происходит в положительной области. Это означает, что условия не благоприятны для длительного сохранения мерзлоты.

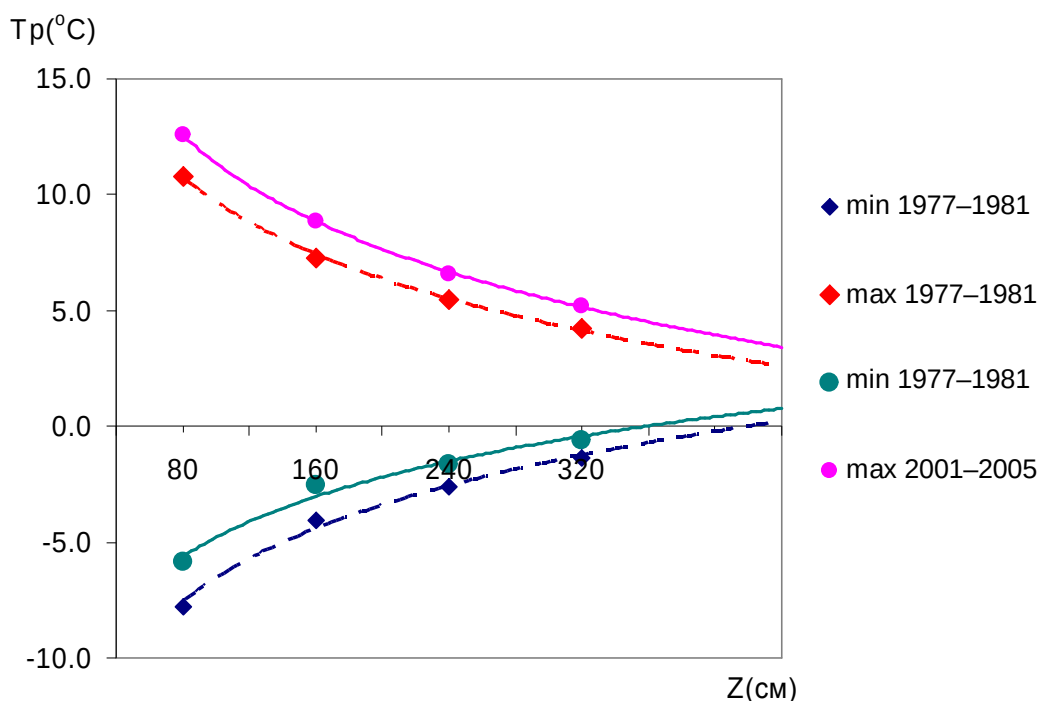


Рис. 3.11. Изменение годового максимума и минимума температуры почвогрунтов на глубинах (Z) по средним данным за 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг. Забайкалье-Приамурье

Среднегодовая температура на глубине 320 см в зоне многолетней мерзлоты

В таблицах, представленных ранее по районам, приводились среднегодовые значения температур на всех глубинах, по которым можно судить о наличии или об отсутствии условий для существования мерзлоты. Определить температуру у подошвы сезонно-талого слоя не удалось, это означает, что глубин наблюдений на метеорологических станциях не достаточно для однозначных выводов о существовании или отсутствии мерзлоты в районе, но они позволяют делать такие выводы о наличии или отсутствии мерзлоты в верхнем 320-см слое почвогрунтов. Кроме того, данные в этом слое позволяют делать оценки об изменении условий в нижележащих слоях более надежно, чем по данным о температуре воздуха, которыми часто пользуются разные исследователи. На рис. 3.12 показаны среднегодовые температуры на глубине 320 см по всем районам в зоне мерзлоты для двух выборок лет – 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг.

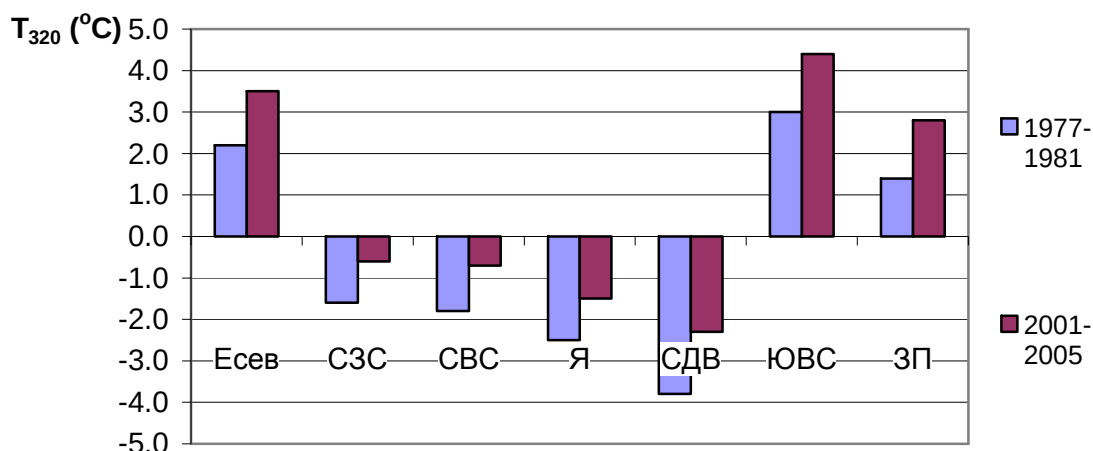


Рис. 3.12. Среднегодовая температура (T_{320}) на глубине 320 см по районам (Есев – Европейский Север Российской Федерации, СЗС – север Западной Сибири, СВС – северо-запад Восточной Сибири, Я – Якутия, СДВ – север Дальнего Востока, ЮВС – юго-запад Восточной Сибири, ЗП – Забайкалье и Приамурье) осреднение по двум интервалам лет – 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг.

Во всех рассмотренных районах Российской Федерации, относящихся к зоне многолетней мерзлоты, за последние три десятилетия произошло повышение температуры почвогрунтов на глубине 320 см. Устойчивое состояние многолетней мерзлоты с отрицательной среднегодовой температурой на глубине 320 см наблюдалось в 1977 – 1981 гг. и сохранилось после потепления на севере Западной Сибири и северо-западе Восточной Сибири, в Якутии и на севере Дальнего Востока. На основе этих данных получается, 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.

Анализ по районам дает обобщенные представления о границах многолетнемерзлых пород, а более детальный пространственный анализ представлен в разделе 3.4.

3.3. Границы многолетней мерзлоты России в XX веке

Начиная с 30-х гг. XX века известно, что южная граница распространения многолетней мерзлоты совпадает с изотермой воздуха приблизительно -2°C [80], но не всегда. Большую роль при этом может оказывать высота снежного покрова (см. главу 2). По данным [80], благодаря глубокому снежному покрову многолетняя мерзлота не была найдена около Туруханска, несмотря на то, что средняя годовая температура там около -8°C .

Согласно работе [80], многолетняя мерзлота начинается несколько севернее Архангельска, идет к устью Оби, пересекает Енисей при впадении в него Нижней Тунгуски, отсюда на карте опускается к югу, проходит Ангара в нижней ее части, пересекает Амур, около Благовещенска опускается по Амуру почти до 48° широты, отсюда круто поворачивает к северу и достигает Охотского моря. Мощность мерзлого слоя колеблется в широких пределах, доходя до 70 м и более. Многолетняя мерзлота нередко обнаруживается под руслами рек, иногда мерзлые слои чередуются с тальми; число таких мерзлых слоев доходит до трех [80].

Позднее, в работе [66] географическое положение южной границы распространения многолетнемерзлых пород описано несколько подробнее. Согласно [66], южная граница (см. рис. 3.13), начинаясь на северной половине Кольского полуострова, протягивается к устью Мезени, затем – к широтному колену Печоры и опускается вдоль западного склона Урала – южнее 64° с.ш. В Западной Сибири южная граница проходит по широтному отрезку Оби, поднимаясь к северу по долине Оби и опускаясь к югу у Енисея. Ниже устья Подкаменной Тунгуски граница резко поворачивает на юг, уходя по правому берегу Енисея за пределы России в горные районы Монголии и Китая. На востоке СССР южная граница распространения мерзлых толщ окантовывает горные хребты вдоль Амура и на Камчатке [66].

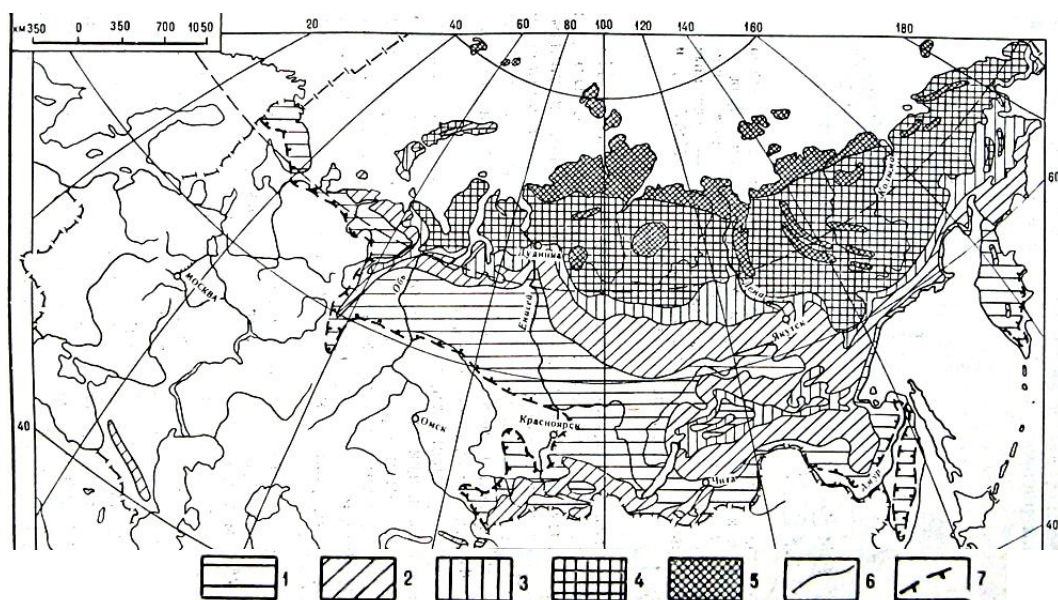


Рис. 3.13. Карта распространения многолетнемерзлых пород (ММП) в СССР (К.А. Кондратьева, 1976) [66]: 1 – зона редкоостровного, островного и массивно-островного распространения ММП со среднегодовыми температурами (t) от $+3$ до -1 и мощностью (M) мерзлой толщи от 0 до 100 м; 2–5 – зоны сплошного распространения ММП; 6 – граница зон ММП; 7 – южная граница криолитозоны

Данные многолетних измерений температуры почвогрунтов, а также результаты численного моделирования свидетельствуют о широко распространенной современной деградации криолитозоны. Она вызвана как повышением температуры воздуха, так и увеличением в ряде случаев высоты снежного покрова. Наблюдения за температурой почвогрунтов, проводимые на метеорологических станциях с помощью вытяжных термометров, показывают, что потепление почвогрунтов в ряде мест может отмечаться за длительный период времени, охватывающий несколько последних десятилетий [17].

Так, по данным [4], за последние 20 лет на северо-западе Сибири температура верхних горизонтов криолитозоны увеличилась в среднем на 1 °С, а измерения вертикального распределения температуры в нефтяных скважинах на Аляске, проведенные в середине 1980-х гг., показали, что с начала XX столетия верхний слой многолетней мерзлоты стал теплее на 2 – 4 °С. Повторные измерения, проведенные в тех же скважинах в 2002 г., зафиксировали дальнейший рост температуры в последние два десятилетия в среднем еще на 3 °С. Северо-восток Канады долгое время являлся исключением из общего правила, поскольку там наблюдалась устойчивая тенденция похолодания, в то время как в остальных регионах Крайнего Севера происходило потепление. В середине 1990-х гг. ситуация изменилась, и в последние несколько лет температура верхнего слоя многолетней мерзлоты в этом регионе выросла в среднем на 2 °С.

Повышение температуры, увеличение глубины сезонного протаивания мерзлых почвогрунтов, изменение их прочностных свойств и сокращение площади распространения многолетней мерзлоты оказывают влияние на многие природные процессы и экономику сибирских регионов.

3.4. Пространственные изменения температуры почвогрунтов вблизи границы зоны многолетней мерзлоты по критериальным оценкам с перспективой на ближайшее десятилетие

При построении карт области распространения многолетней мерзлоты учитывается совокупность различных факторов, таких, как среднегодовая температура почвогрунтов, мощность многолетнемерзлых толщ, характер распространения многолетнемерзлых толщ по степени прерывистости таликами и др. [66]. Например, карта К.А. Кондратьевой (1976) распространения многолетнемерзлых пород территории бывшего СССР, приведенная в [66] и в пункте 3.3, построена с учетом этой совокупности факторов. Но из-за отсутствия такой совокупности данных за длительный промежуток времени, карты распространения многолетней мерзлоты, приведенные в различных

работах, носят весьма вероятностный характер. Часто карты построены на косвенных параметрах, таких, например, как температура воздуха. В работе [7] приведена карта многолетней мерзлоты в Северном полушарии, полученная в результате модельного расчета с использованием данных о климате (температура воздуха и осадки).

Построение карт по специальным геокриологическим наблюдениям в зоне многолетней мерзлоты затруднительно, так как в настоящее время (по данным на 2004 г.) существует только 14 действующих наблюдательных объектов мониторинга криолитозоны [88], что крайне недостаточно для мониторинга распространения мерзлоты. При этом они размещены очень неравномерно по территории криолитозоны.

Поэтому в последние годы возник интерес к использованию имеющихся длительных рядов наблюдений за температурой почвогрунтов на гидрометеорологических станциях для оценки многолетних термических изменений в почвогрунтах и их пространственных особенностей [88], но до сих пор анализ проводился по выборочным гидрометеорологическим станциям. К тому же ряды, по которым ранее проводились исследования, не охватывали последние годы. Таким образом, в опубликованных в последние годы работах на основе анализа ограниченного количества данных приведены результаты, которые нуждаются в уточнении на большем материале.

Новые пополненные массивы данных о температуре почвогрунтов на глубинах до 320 см дают возможность точнее оценить изменение географического положения характерных изотерм в почвогрунтах за последнее тридцатилетие (1976 – 2006 гг.). Сведения о температуре почвогрунтов более точно, чем сведения о температуре воздуха, отражают одно из основных условий существования мерзлоты на глубинах. Поэтому в настоящем разделе ставилась задача по данным сети гидрометеорологических станций о температуре почвогрунтов за последние три десятилетия получить изотермы температуры почвогрунтов на глубине 320 см в начале и в конце анализируемого периода лет и описать изменение географического положения изотерм за это время.

Для работы использовались данные о температуре почвогрунтов по вытяжным термометрам на станциях Российской Федерации. Среднегодовые значения температуры почвогрунтов на глубине 320 см, осредненные за 1976 – 2006 гг., вычисленные по каждой станции, послужили основой для построения карты (рис. 3.14).

Интервал времени, в течение которого островная мерзлота сохраняется в процессе таяния, зависит от мощности островков, а, следовательно, от объема льдистых пород, подвергающихся воздействию положительных температур.

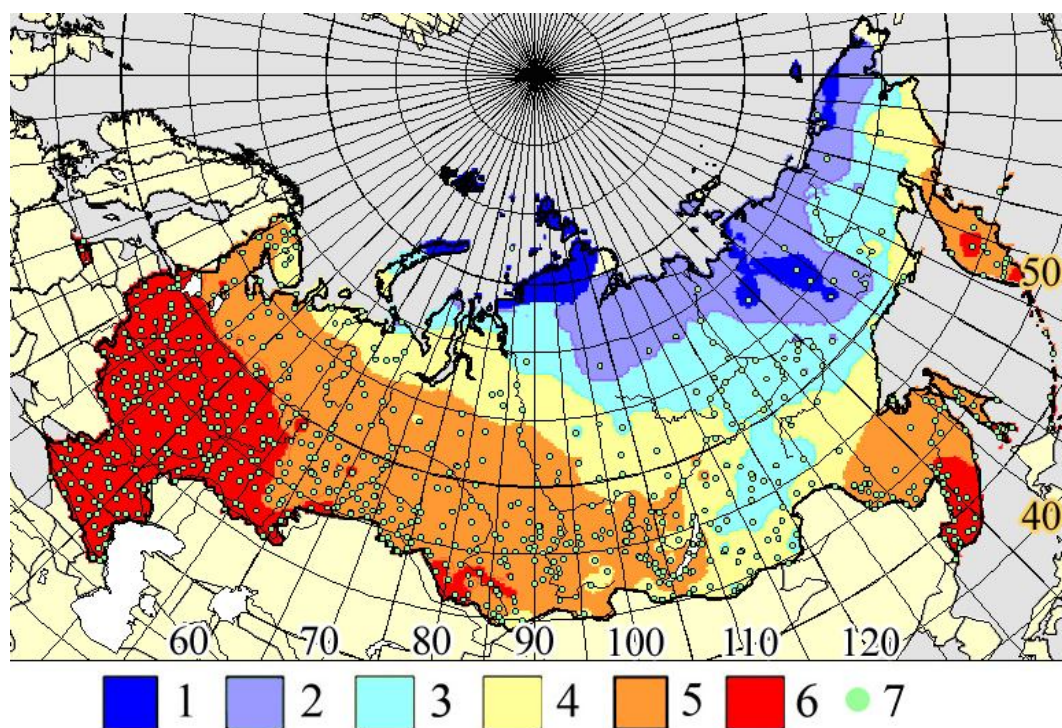


Рис. 3.14. Среднегодовое значение температуры почвогрунтов (t) на глубине 320 см за 1976 – 2006 гг.: 1 – $t \leq -6$; 2 – $-6 < t \leq -3$; 3 – $-3 < t < 0$; 4 – $0 \leq t < 3$; 5 – $3 \leq t < 6$; 6 – $t \geq 6$; 7 – метеостанция

Зона распространения многолетнемерзлых пород, включая области прерывистой и островной мерзлоты, в настоящее время определяется среднегодовыми температурами пород $+3^{\circ}\text{C}$ и ниже [66]. Далее рассмотрим динамику во времени положения характерной изотермы среднегодовой температуры почвогрунтов.

По среднегодовым данным за 1976 – 2006 гг. на глубине 320 см по каждой станции построено уравнение линейного тренда среднегодовой температуры почвогрунтов, а затем по уравнению вычислены трендовые значения температуры почвогрунтов в 1976 и 2006 гг. на глубине 320 см (461 станция). Вычисленные значения в сглаженном виде отражают температурные условия на 1976 г. и отдельно на 2006 г. на каждой станции и дают возможность сравнения изменений за 30 лет. А картирование значений по всем станциям позволяет изучать пространственные особенности температурных условий в 1976 и 2006 годах.

Согласно работе [66], за южную границу условий, при которых многолетнемерзлые почвогрунты встречаются, примем характерную изотерму $+3^{\circ}\text{C}$ среднегодовых значений температуры почвогрунтов на заданной глубине. Такой выбор хорошо согласуется с определением южной границы многолетней мерзлоты в работе [57] и не противоречит определениям, данным в работах [66, 110], которые приводятся в главе 2 (раздел 2.1).

На рис. 3.15 показана карта пространственного распределения среднегодовых температур почвогрунтов в России на глубине 320 см, вычисленных на 2006 г. по уравнениям тренда. На карте выделена изотерма $+3^{\circ}\text{C}$ на 2006 г. и нанесена изотерма $+3^{\circ}\text{C}$, вычисленная аналогично на 1976 г. для сравнения.

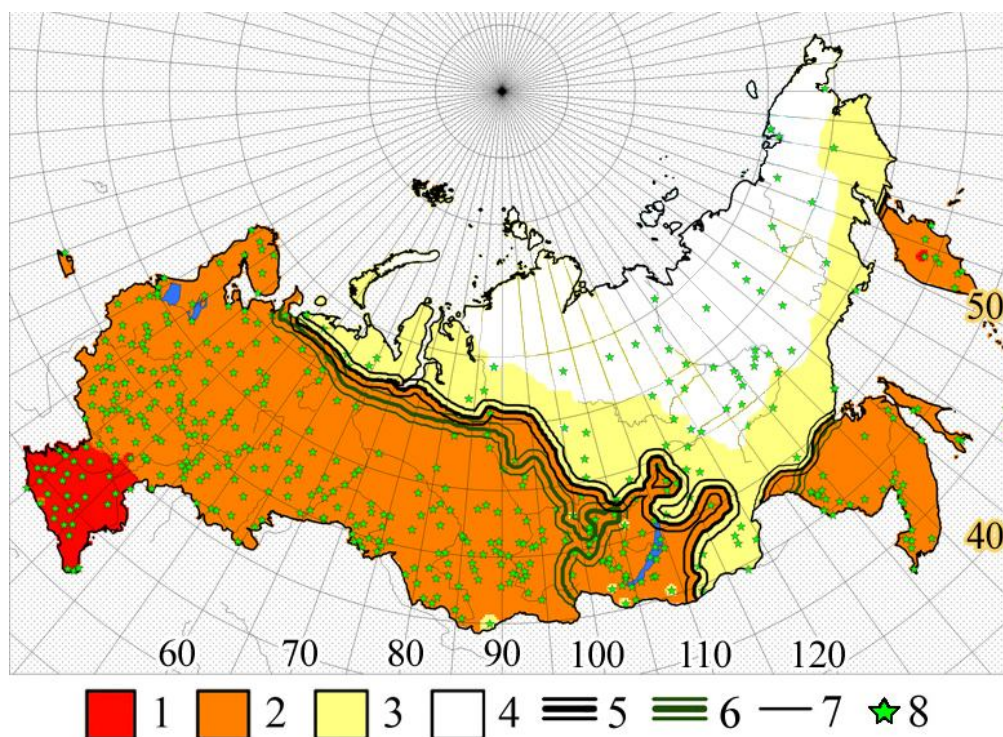


Рис. 3.15. Пространственное распределение среднегодовых температур почвогрунтов (t) на глубине 320 см в России на 2006 г. и изотерма $+3^{\circ}\text{C}$ в 1976 г.: 1 – $10 \leq t < 15$; 2 – $3 < t < 10$; 3 – $0 < t \leq 3$; 4 – $t \leq 0$; 5 – изотерма $+3^{\circ}\text{C}$ в 2006 г. с доверительным интервалом; 6 – изотерма $+3^{\circ}\text{C}$ в 1976 г. с доверительным интервалом; 7 – граница России; 8 – метеостанции

Для представления на карте пространственного интервала достоверности изотерм посчитан доверительный интервал тех значений, которые использовались для построения карт. Доверительный интервал на 95%-ном уровне значимости вычислялся с использованием критерия Стьюдента. Величина доверительного интервала, равная $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ от значения изотермы, была получена в результате обобщения вблизи характерной изотермы. Далее на карте температуры почвогрунтов на глубине 320 см в 1976 и 2006 гг. с учетом среднего расстояния на местности (в км) между изолиниями вблизи характерной изотермы $+3^{\circ}\text{C}$ определено соответствие между доверительным интервалом изотермы в градусах Цельсия и доверительным интервалом пространственного ее положения в километрах.

Оказалось, что доверительный интервал положения характерной изотермы составляет примерно ± 50 км. Доверительный интервал отложен на картах в обе стороны от характерной изотермы. На рис. 3.15 изотермы $+3^{\circ}\text{C}$ на 2006 и на 1976 гг. показаны с доверительными интервалами.

Положение полученной изотермы температуры почвогрунтов $+3^{\circ}\text{C}$ для 1976 года на большей части России хорошо совпадает с южной границей криолитозоны по К.А. Кондратьевой в 1976 году [66]. Южная граница криолитозоны определена на карте К.А. Кондратьевой как южная граница зоны островного распространения ММП со среднегодовыми температурами от $+3^{\circ}\text{C}$ до -1°C и мощностью мерзлой толщи от 0 до 100 м.

Среднегодовая температура ММП – это лишь один из факторов, влияющих на положение южной границы многолетней мерзлоты. При построении карты К.А. Кондратьевой использовалась совокупность нескольких факторов. Этим можно объяснить некоторые различия между полученной в настоящей работе изотермой и положением южной границы криолитозоны на карте К.А. Кондратьевой. Существенные различия наблюдаются только на полуострове Камчатка и в Примурье, где полученная изотерма температуры почвогрунтов $+3^{\circ}\text{C}$ в 1976 году проходит севернее, чем на карте распространения ММП К.А. Кондратьевой.

В целом хорошее согласие положения полученной изотермы $+3^{\circ}\text{C}$ в 1976 г. с границей многолетней мерзлоты тех лет позволяет использовать аналогичную изотерму 2006 года для косвенного анализа положения границы многолетней мерзлоты в 2006 году. При этом учитывается, что температура почвогрунтов в определенных грациях является условием, необходимым, но недостаточным для того, чтобы делать выводы относительно изменения границ многолетней мерзлоты. Выводы можно делать только относительно смещения изотерм, характерных для разных видов мерзлоты на глубинах.

Наибольшее смещение характерной изотермы к северу произошло в Предбайкалье – Забайкалье и составило около 500 км от южной границы России (см. рис. 3.15). На Западно-Сибирской равнине и на западе Среднесибирского плоскогорья смещение изотермы к северу составило до 200 – 300 км (см. рис. 3.15). Достоверными являются различия при смещении более 100 км. Приведенные оценки смещения характерной изотермы не означают фактическое смещение границы многолетней мерзлоты на такую же величину, но показывают изменение на обширной территории одного из главных условий существования мерзлых почвогрунтов. В районах смещения изотерм происходят медленные процессы таяния мерзлых почвогрунтов и пони-

жения кровли мерзлоты. При этом вероятна постепенная деградация многолетней мерзлоты.

Величина приведенных оценок согласуется с работой [30], где на примере Центральной Якутии показано, что при повышении температуры воздуха на 2°C произойдет смещение южной границы многолетней мерзлоты на север на 5° с.ш., что составляет более 500 км. В разделе 1.5 главы 1 (рис. 1.2) данной работы получено, что повышение среднегодовой температуры воздуха в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке за период с 1976 по 2006 г. составляет от $0,4$ до $0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет, т.е. за 30 лет температура воздуха повысилась от $1,2$ до $1,8^{\circ}\text{C}$, т.е. на величину, близкую к 2°C .

Аналогичное исследование характерных изотерм выполнено по данным о температуре на глубине 80 см. Большая межгодовая изменчивость на глубине 80 см создает более широкий пространственный доверительный интервал изотермы. Поэтому достоверных различий в положениях изотермы $+3^{\circ}\text{C}$ в 2006 и 1976 гг. не обнаружено. Большая межгодовая изменчивость температуры почвогрунтов на глубине 80 см является следствием проникновения сверху короткопериодных изменений температуры.

Выполненный анализ показал, что на территории России за тридцатилетний период с 1976 по 2006 г. на глубине 320 см произошло изменение термических условий почвогрунтов и смещение к северу характерной изотермы. Вслед за смещением характерной изотермы через некоторое время может последовать смещение южной границы многолетней мерзлоты. Приведенные оценки смещения характерной изотермы не тождественны смещению границы мерзлоты в те же годы. Они показывают тенденции таяния мерзлых пород, а деградация (полное исчезновение) многолетней мерзлоты определяется еще толщиной мерзлого слоя и другими условиями.

В 2006 г. учреждениями Росгидромета составлялся стратегический прогноз изменений климата и его последствий на период до 2015 года [99]. Для прогностических оценок в стратегическом прогнозе использовался метод построения линейных трендов метеорологических величин. По аналогии со стратегическим прогнозом в настоящей работе вычислены ожидаемые трендовые значения среднегодовой температуры почвогрунтов на глубине 320 см в 2015 году (461 станция). По полученным значениям построена карта пространственного распределения температуры почвогрунтов на глубине 320 см в 2015 году. На карте определено положение изотермы $+3^{\circ}\text{C}$ ожидаемой температуры почвогрунтов к 2015 г. и ее доверительного интервала ± 50 км исходя из предположения, что в ближайшее время сохранится тенденция тренда периода 1976 – 2006 гг.

При анализе этой карты получено, что на глубине 320 см к 2015 г., по сравнению с 2006 г., изотерма $+3^{\circ}\text{C}$ может сместиться в северном направлении на разных долготах на незначительные расстояния, предельное смещение может достигать 50 км на юге Западной Сибири и примыкающей части Восточной Сибири. Однако это не выходит за пределы доверительного интервала изотермы [112], поэтому карта не приводится.

Выводы

1. По всей сети станций России по данным наблюдений за 40 лет показано потепление почвогрунтов до глубины 320 см на обширной территории России. При этом максимальные тренды потепления почвогрунтов на глубине 320 см обнаружены на территории южной половины Сибири.

2. За последние три десятилетия на территории многолетней мерзлоты произошло повышение минимальных и максимальных за год значений температуры почвогрунтов на всех глубинах до 320 см.

3. В зоне многолетней мерзлоты России три последних десятилетия устойчивое состояние мерзлоты с отрицательной среднегодовой температурой на глубинах до 320 см наблюдалось на севере Западной и северо-западе Восточной Сибири, в Якутии и на севере Дальнего Востока, а на Европейском Севере, на юго-западе Восточной Сибири, в Забайкалье и Приамурье установились положительные среднегодовые значения температуры (от $+1,5$ до $+3,3^{\circ}\text{C}$).

4. На территории Предбайкалья – Забайкалья за период с 1976 по 2006 г. на глубине 320 см произошло смещение к северу на 500 ± 50 км изотермы, характерной для южной границы островной многолетней мерзлоты.

5. По прогностическим оценкам на 2015 год изотерма $+3^{\circ}\text{C}$ температуры почвогрунтов на глубине 320 см может сместиться в северном направлении на разных долготах на незначительные расстояния, предельное смещение может достигать 50 км. При этом в оценках тенденций к 2015 году не получено статистически достоверных изменений географического положения изотермы $+3^{\circ}\text{C}$ на глубине 320 см.

ГЛАВА 4. ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В ЗОНЕ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

4.1. Устойчивость зданий и сооружений, построенных на много- летней мерзлоте в меняющемся климате

Одной из обострившихся в последние годы проблем является деструктивное воздействие климатически обусловленной деградации многолетней мерзлоты на инфраструктуру территорий [5, 36, 64]. Многие промышленные и жилые здания, нефтяные вышки, насосные станции и трубопроводы, дороги, мосты, взлетно-посадочные полосы в северных регионах построены на многолетней мерзлоте и рассчитаны на эксплуатацию в определенном диапазоне изменения внешних условий. Изменения параметров природной среды, выходящие за рамки расчетного диапазона, могут вызвать повреждение объектов инфраструктуры, их частичное или полное разрушение, что может иметь опасные, в том числе катастрофические, последствия [5, 56].

Увеличение температуры почвогрунтов приводит к уменьшению несущей способности свайных фундаментов, оснований и опор [5, 36, 103].

В разделе 3.1 подробно рассмотрено изменение среднегодовой температуры почвогрунтов на глубинах в последние десятилетия и показано потепление почвогрунтов на обширной территории за период 1965 – 2006 гг., 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.

Как известно, в результате повышения температуры многолетнемерзлых пород подавляющее большинство сооружений, построенных на мерзлых почвогрунтах, деформируются [102]. Оттаивание мерзлых пород сопровождается просадками земной поверхности, которые могут стать причинами нарушения устойчивости зданий и инженерных сооружений нефтегазового комплекса [56].

Данные, приведенные в табл. 4.1, показывают, что многие здания в городах, расположенных в области распространения многолетней мерзлоты, находятся в настоящее время в опасном состоянии из-за уменьшения прочности и несущей способности фундаментов.

В Якутске за период с начала 1970-х гг. более 300 зданий получили серьезные повреждения в результате просадок мерзлых почвогрунтов. Статистика свидетельствует о том, 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,

Таблица 4.1

Современное состояние зданий в городах
Крайнего Севера России [139]

Город	Доля зданий, находящихся в опасном состоянии, %
Норильск	10
Тикси	22
Дудинка	55
Диксон	35
Певек, Амдерма	50
Чита	60
Воркута	80

на 61% – в Якутске и на 90% – в Амдерме [5, 139]. При этом причины таких повреждений различны: это и современные изменения климата, и различные антропогенные воздействия, вызывающие ускоренный износ фундаментов.

Более 75% всех зданий и сооружений в зоне многолетней мерзлоты построено и эксплуатируется по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований [35]. Согласно этому принципу [97], многолетнемерзлые грунты основания используются в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения. Однако этот принцип строительства не учитывает современные изменения климата, которые оказывают влияние на многолетнемерзлые почвогрунты.

В контексте проблемы изменения климата важным является то, что нормативные документы и методы, на основании которых проектируется строительство на многолетней мерзлоте, до настоящего времени не учитывают воздействие антропогенного потепления, в результате которого происходит уменьшение запаса прочности возведенных и строящихся конструкций [15].

В последнее десятилетие деструктивное воздействие увеличения глубины сезонного протаивания поверхностного слоя почвогрунтов на сооружения в области распространения многолетней мерзлоты усилилось [5].

4.2. Тепловые воздействия сооружений на многолетнемерзлые почвогрунты, устойчивость сооружений

Не все проблемы устойчивости сооружений, построенных на мерзлоте, являются следствием изменения климата. Особые климатические условия в зоне мерзлоты создают особые условия при проектировании и эксплуатации сооружений. Главнейшей особенностью, которую следует обязательно учитывать при строительстве на многолетнемерзлых почвогрунтах, являются тепловые воздействия сооружений на температурное поле и свойства многолетнемерзлых почвогрунтов.

Вне области многолетнемерзлых почвогрунтов проектировщики и строители не учитывали тепловые воздействия сооружений на почвогрунты оснований, так как в обычных условиях тепловые влияния зданий и сооружений существенно не сказывались на прочности почвогрунтов оснований. При строительстве же сооружений на многолетнемерзлых почвогрунтах тепловые влияния имеют огромное значение, при этом важны тепловые влияния локальных факторов (возведение отапливаемых зданий, сооружений, подземных тепловых и водных коммуникаций и пр.) [107].

Основной особенностью проектирования и строительства на многолетнемерзлых почвогрунтах, в отличие от обычных условий, является необходимость учета и регулирования теплообмена почвогрунтов с сооружениями и с внешней средой [66]. В сооружениях, возводимых на многолетнемерзлых почвогрунтах без принятия особых, отличных от обычных условий, мер и методов, возникают деформации, затрудняющие эксплуатацию сооружений и приводящие к их полному разрушению.

При протаивании многолетнемерзлых почвогрунтов в основаниях зданий и сооружений, как показывает многолетняя практика строительства на многолетнемерзлых почвогрунтах, возникают значительные, часто совершенно недопустимые деформации фундаментов и надфундаментных строений. Так, по данным П. Д. Бондарева, производившем обследования зданий, возведенных на многолетнемерзлых почвогрунтах в г. Воркуте и Воркутинском районе, оказалось, что около 80% зданий имели недопустимые деформации, в том числе: сильно деформированных каменных (кирпичных) – 78% (полное разрушение стен наблюдалось у 6% зданий, а наличие сквозных трещин в зданиях – у 67%); деревянных рубленых – 75% и деревянных каркасных – 90%. Из числа обследованных каменных зданий 30% имели деформации катастрофического характера и требовали неотложного капитального ремонта, а из числа деревянных зданий 50% нуждались в капитальном и капитально-восстановительном ремонте [107].

Однако недопустимые деформации фундаментов и надфундаментных строений усиливаются влиянием техногенных факторов. В [1, 36] показано, что хозяйственное освоение территории привело к существенным локальным изменениям состояния ММП и повлекло за собой нарушение устойчивости сооружений.

Ранее рассматривались проблемы устойчивости зданий и сооружений в меняющемся климате в зоне многолетней мерзлоты, а приведенные факты показывают, что причиной нарушения устойчивости сооружений может быть локальная деградация мерзлоты в результате техногенной эволюции природных ландшафтов [36, 53] и многочисленных нарушений в эксплуатации подполий и других охлаждающих геотехнических систем, а также при отсутствии цивилизованной канализации (в зданиях старой постройки). Эта группа причин имеет технический характер и в настоящей работе не рассматривается.

4.3. Изменение глубины протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов как характеристика возможной неустойчивости фундаментов зданий и сооружений

Наиболее изучаемой и достаточно востребованной для практических целей характеристикой в регионах, занимаемых многолетней мерзлотой, является глубина сезонного протаивания [61, 71].

Глубина проникновения годового хода температуры определяет глубины сезонного протаивания почвогрунтов в зоне мерзлоты и промерзания почвогрунтов на остальной территории. Глубины сезонного промерзания и протаивания являются важнейшими характеристиками при строительстве фундаментов всех сооружений. Особое значение глубина сезонного протаивания приобретает в зоне мерзлоты со специфическими особенностями почвогрунтов, зависящими от климата. Поэтому очень важно определить изменения в годовом ходе температуры почвогрунтов на разных глубинах, произошедшие за последние десятилетия интенсивных изменений климата.

Данные мониторинга глубин сезонного протаивания неоднократно анализировались [50, 83, 86, 90, 119, 121, 133, 135], особенно подробный анализ выполнен для регионов Западной Сибири. Результаты этого анализа убедительно показывают, что с конца XX века в Западной Сибири происходит повышение температуры многолетнемерзлых почвогрунтов и наблюдается слабое увеличение глубин сезонного протаивания [71].

Глубина летнего протаивания определяет выбор глубины заложения фундаментов сооружений и некоторые их конструктивные особенности [107].

Причиной возникновения значительных деформаций сооружений в условиях многолетнемерзлых почвогрунтов является также не-

равномерное и значительное по величине морозное пучение верхних слоев почвогрунтов и выпучивание фундаментов при промерзании окружающих их почвогрунтов [107]. Однако здесь рассматривается только влияние сезонного протаивания, которое, по данным [14], является наиболее существенным отрицательным фактором. Просадки почвогрунтов являются главнейшей причиной недопустимых деформаций сооружений, возводимых на многолетнемерзлых почвогрунтах [107].

При проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений на многолетнемерзлых почвогрунтах, находящихся в мерзлом состоянии, минимальная глубина заложения фундаментов определяется согласно табл. 4.2.

Таблица 4.2

Минимальная глубина заложения фундаментов по СНиП II-18-76 [97]

Фундаменты	Минимальная глубина заложения фундаментов, Н (м)
Фундаменты (всех типов, кроме свайных) зданий и сооружений	Н _т + 1
Свайные фундаменты зданий и сооружений	Н _т + 2
Сваи опор мостов	Н _т + 4
Фундаменты зданий и сооружений, возводимых на подсыпках, а также зданий и сооружений временного назначения	Не нормируется

Примечание. Н_т – глубина сезонного протаивания.

Известно, что процесс сезонного протаивания осуществляется исключительно в теплый сезон [90] (на глубинах теплый сезон наступает с запаздыванием относительно самых теплых месяцев по температуре воздуха), поэтому при изучении глубины протаивания важными являются оценки трендов температуры почвогрунтов в теплые месяцы.

В разделе 1.5 подробно рассмотрены современные изменения температуры воздуха по сезонам года на территории России и показано повышение температуры воздуха на обширной территории Сибири в теплый сезон. В частности, за период 1976 – 2006 гг. показано повышение температуры воздуха в весенний и летний сезоны, которое составило в разных районах от 0,4 до 0,8°C/10 лет. Для обнаружения

изменений температуры почвогрунтов на глубинах в теплые месяцы года по современным данным (за период с 1965 по 2005 г.) выполнен анализ трендов температуры почвогрунтов на глубинах 80, 160 и 320 см. Учитывая запаздывание по глубинам наступления максимума и минимума годового хода температуры почвогрунтов, анализ летних температурных состояний проводился по данным со сдвигом. Величина сдвига определялась на каждой станции по положению максимума осредненного годового хода температуры на анализируемой глубине. Для этого осредненный годовой ход температуры почвогрунтов вычислялся за 1965 – 2005 гг.

Далее по каждой станции строились ряды температуры почвогрунтов средней за три самых теплых месяца (теплый сезон). Ряды получены по данным на каждой глубине 80, 160 и 320 см по сезонам, границы которых определялись на каждой глубине тремя самыми теплыми месяцами. По этим рядам температур теплого сезона на указанных глубинах по каждой станции вычислялись значения линейных трендов за период 1965 – 2005 гг. По полученным значениям построены карты пространственного распределения коэффициентов линейного тренда температуры почвогрунтов теплого сезона. Оценка достоверности трендов проводилась на основе критерия Стьюдента. Ниже описано пространственное распределение трендов, которое в основных очагах подтверждается достоверными трендами с вероятностью 95%.

В теплые месяцы года тренды температуры почвогрунтов на глубинах 80 – 320 см преимущественно положительные и статистически достоверные. Наибольшее потепление почвогрунтов в теплый сезон наблюдается в Сибири и составляет ($0,4 - 0,6^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$). На глубине 80 и 160 см тренды температуры почвогрунтов $0,5 - 0,6^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$ встречаются на станциях в южной половине Сибири и в средней Сибири, а на глубине 320 см (рис. 4.1) тренды с большими значениями ($0,5 - 0,6^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$) встречаются только на станциях южной части Восточной Сибири, в районе Ангары, Предбайкалья и Забайкалья.

Таким образом, показано наличие благоприятных условий для увеличения глубины сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты.

В разделе 3.2 подробно рассмотрен годовой ход температуры на глубинах и его изменения за последние три десятилетия и показано увеличение глубины сезонного протаивания в четырех районах в зоне многолетней мерзлоты: север Западной Сибири, северо-запад Восточной Сибири, Якутия, север Дальнего Востока.

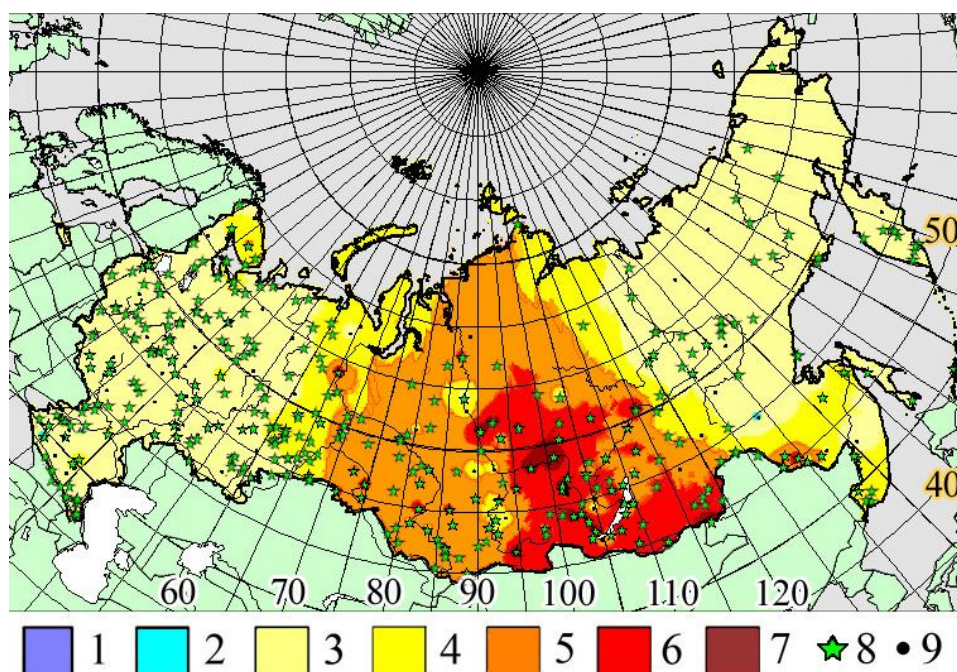


Рис. 4.1. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда температуры почвогрунтов ($^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) за период 1965 – 2005 гг. на глубине 320 см. Теплый сезон: 1 – $-0,2 \leq k < -0,1$; 2 – $-0,1 \leq k < 0$; 3 – $0 < k \leq 0,1$; 4 – $0,1 < k \leq 0,3$; 5 – $0,3 < k \leq 0,4$; 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

Используя тот же принцип расчета и построения графиков, который описан в разделе 3.2 при изучении годового максимума и минимума температуры почвогрунтов на глубинах, рассмотрим изменения глубины сезонного протаивания на отдельных характерных станциях. Графики позволяют это сделать. Ниже в качестве примера представлены изменения глубины сезонного протаивания почвогрунтов по населенным пунктам Сибири, уязвимым с точки зрения увеличения глубины сезонного протаивания.

Логарифмическая аппроксимация значений более плавно показывает изменение экстремумов годового хода на разных глубинах. Пересечение сглаженных кривых с осью глубин показывает глубину, на которой экстремум принимает нулевое значение. Пересечение кривой максимумов с осью глубин показывает глубину сезонного протаивания. Сравнение кривых максимумов для двух выборок лет позволяет определить изменение глубины сезонного протаивания почвогрунтов. В Жиганске глубина сезонного протаивания в 1965 – 1969 гг. была около 210 см, к 2001 – 2005 гг. увеличилась примерно на 60 см, в настоящее время – около 270 см. Таким образом, согласно нормам СНиП [97] (см. табл. 4.2), протаивание в настоящее время достигает оснований фундаментов тех зданий и сооружений, которые были построены в конце 60-х и начале 70-х гг.

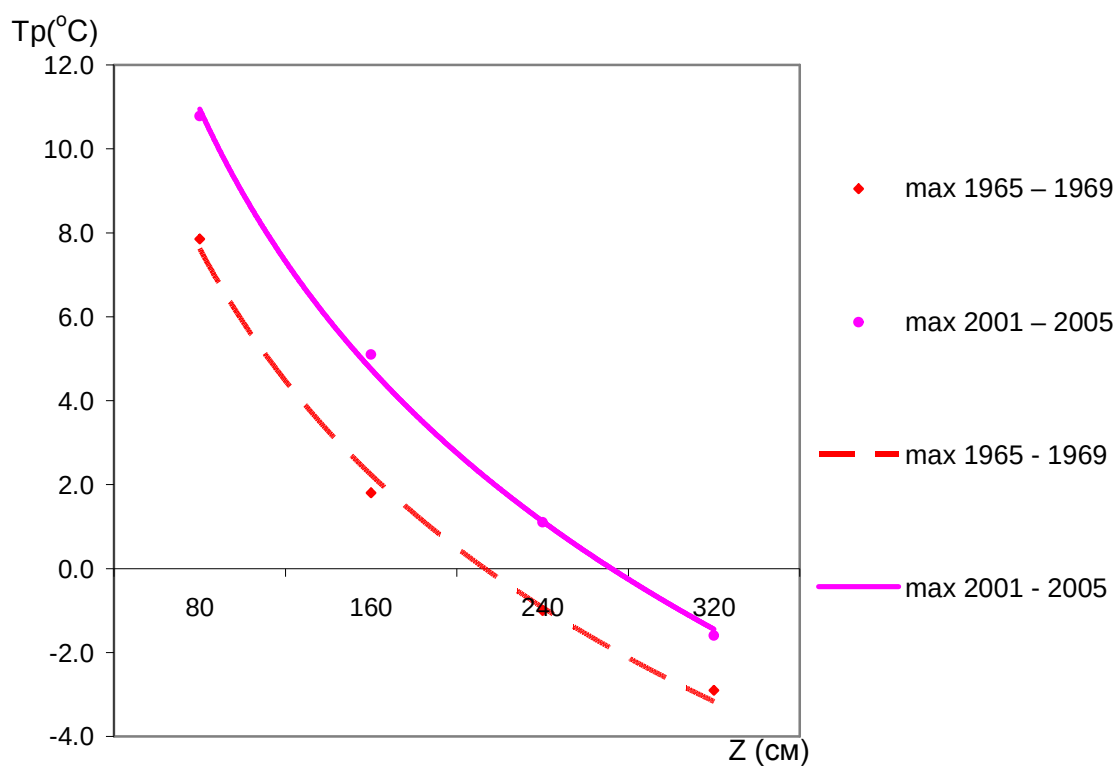


Рис. 4.2. Изменение сезонного протаивания почвогрунтов. Максимальные (max) значения в годовом ходе температуры на глубинах (Z) по средним данным по двум выборкам лет: 1965 – 1969 и 2001 – 2005 гг. Станция Жиганск

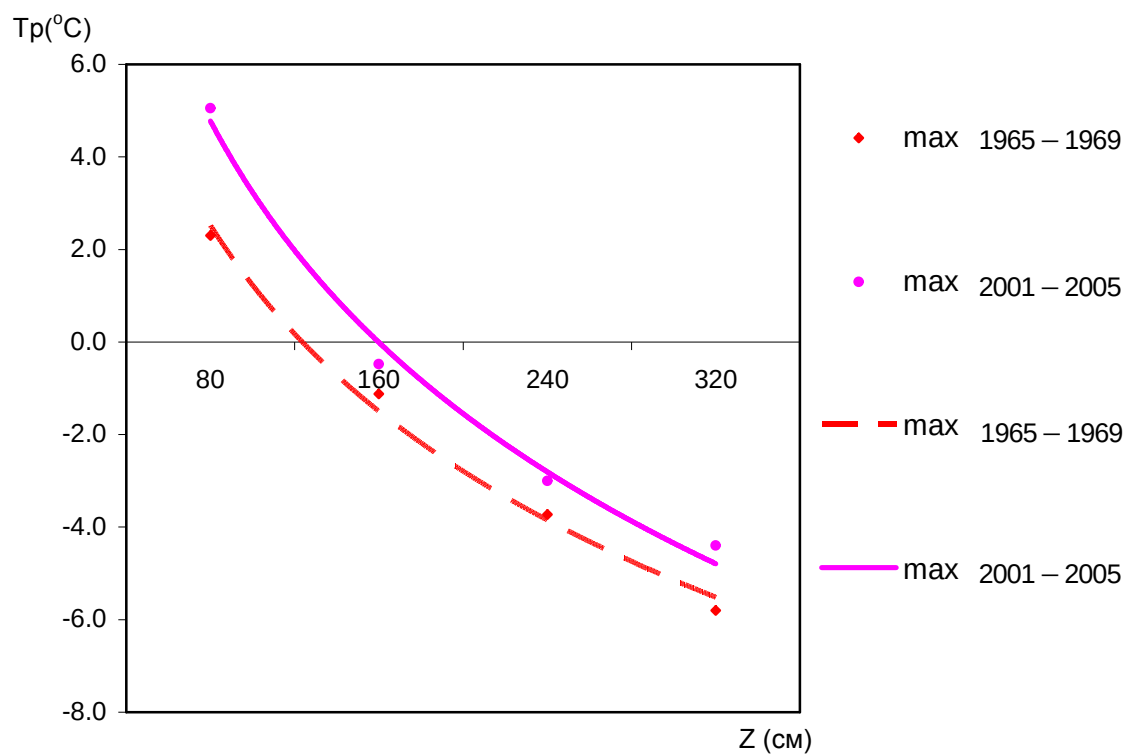


Рис. 4.3. Изменение сезонного протаивания почвогрунтов. Максимальные (max) значения в годовом ходе температуры на глубинах (Z) по средним данным по двум выборкам лет: 1965 – 1969 и 2001 – 2005 гг. Верхоянск

В Верхоянске изменения глубины сезонного протаивания не так ярко выражены, как в Жиганске, но тем не менее глубина сезонного протаивания увеличилась приблизительно на 40 см. Такое увеличение также способствует значительному уменьшению устойчивости зданий и сооружений, построенных ранее. Особенностью изменений экстремумов на станции Верхоянск является понижение минимальных за год температур и повышение максимальных, что показывает увеличение амплитуды годового хода температуры почвогрунтов на всех глубинах до 320 см.

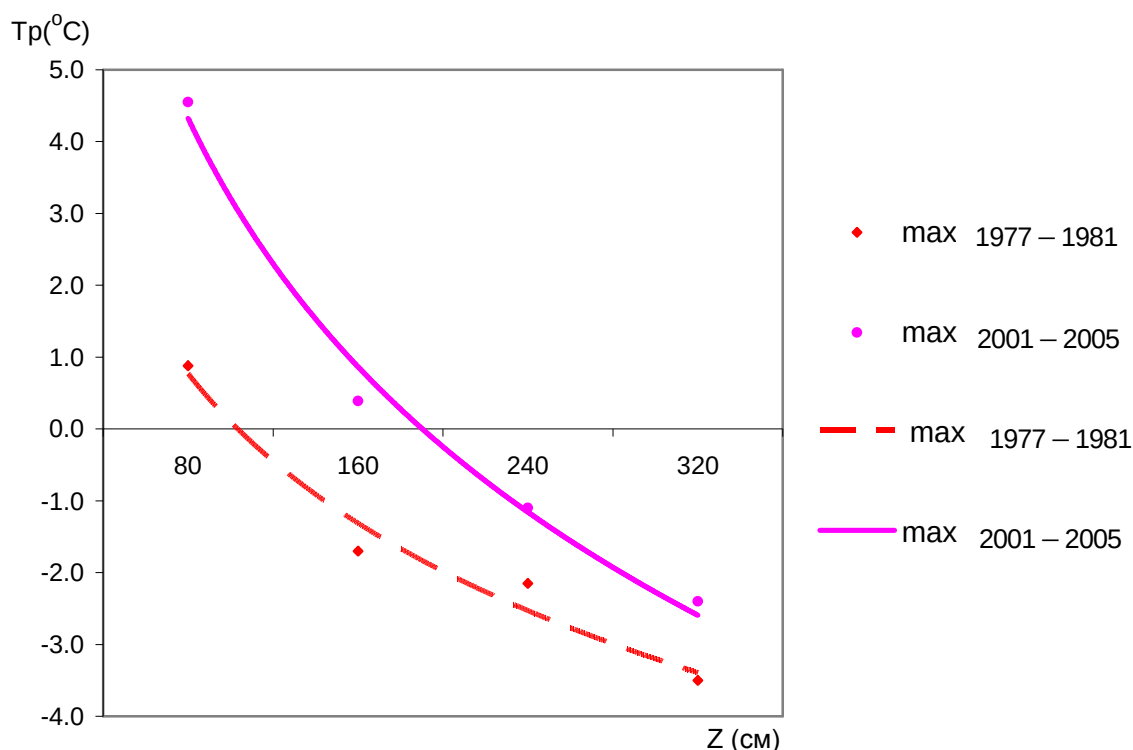


Рис. 4.4. Изменение сезонного протаивания почвогрунтов. Максимальные (max) значения в годовом ходе температуры на глубинах (Z) по средним данным по двум выборкам лет: 1977 – 1981 и 2001 – 2005 гг. Норильск

В Норильске глубина сезонного протаивания увеличилась за период 2001 – 2005 гг., по сравнению с периодом 1977 – 1981 гг., примерно на 80 см, 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 [139].

Увеличение глубины сезонного протаивания почвогрунтов является общей тенденцией в зоне многолетней мерзлоты. Однако на стационаре Чабыда (окрестности Якутска) в конце XX в. получен [90] противоположный результат, т. е. по данным работы [90], в окрестности Якутска наблюдается уменьшение глубин сезонного протаивания за период 1986 – 2003 гг. Авторский анализ, выполненный по данным

метеорологических станций, подтвердил, что на этой станции на глубине 320 см максимальные значения годового хода действительно уменьшились, несмотря на то, что в среднем по Якутии, как было показано ранее, на этой глубине максимальные значения годового хода увеличились. Основные результаты по станции Якутск показаны на рис. 4.5.

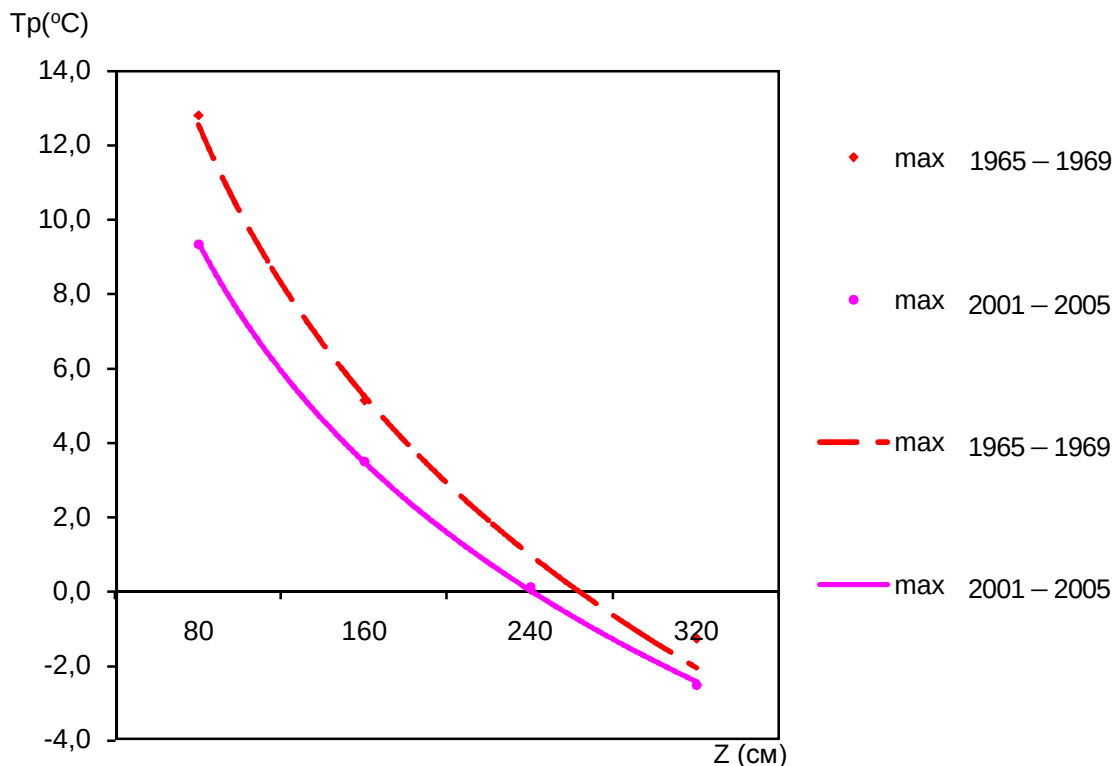


Рис. 4.5. Изменение сезонного протаивания почвогрунтов. Максимальные (max) значения в годовом ходе температуры на глубинах (Z) по средним данным по двум выборкам лет: 1965 – 1969 и 2001 – 2005 гг. Якутск

Рис. 4.5 показывает, что в Якутске в последние годы вместе с уменьшением максимальных значений температуры обнаружилось слабое уменьшение глубины сезонного протаивания. Аналогичная тенденция обнаружена в непосредственной близости от Якутска (около 80 км) на станции Покровск. Несмотря на отмеченные особенности отдельных станций, все же общей тенденцией на огромной территории для всей Якутии и других регионов значительной части зоны многолетней мерзлоты (см. главу 3) является увеличение максимальных за год значений температур и глубины сезонного протаивания. Кроме того, и в будущем, согласно расчетам [4], такая тенденция будет сохраняться. По данным работы [4], только повышение температуры воздуха, ожидаемое к середине XXI в., может привести к увеличению глубины сезонного протаивания в среднем на 25%, а в отдельных регионах – более чем на 50%.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что последствиями современных изменений климата является общая тенденция увеличения глубины сезонного протаивания почвогрунтов на огромной территории. Климатообусловленное увеличение глубины протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов в основаниях зданий и сооружений создает деформации фундаментов и надфундаментных строений. Противоположную тенденцию на отдельных станциях можно рассматривать как исключение из общей закономерности, связанное с некоторыми региональными особенностями.

4.4. Использование современных данных о глубине протаивания при закладке фундаментов технических сооружений в зоне многолетней мерзлоты

Глубина сезонного протаивания является важной характеристикой, определяющей выбор глубины закладки фундаментов всех технических сооружений, строящихся на многолетней мерзлоте. Увеличение глубины сезонного протаивания, не предусмотренное несколько десятилетий назад при закладке фундаментов, является негативным последствием изменений климата. Прочность оснований сооружений, построенных 30 – 40 лет назад по СНиП того периода времени (СНиП II-Б. 6-66 и позже СНиП II-18-76), не соответствует современным данным о глубине сезонного протаивания на значительной части зоны многолетней мерзлоты. В новых климатических условиях глубина необходимого заложения фундаментов зданий и сооружений существенно увеличилась в связи с увеличением сезонного протаивания.

В табл. 4.1 уже приводились данные о плохом состоянии зданий в городах Крайнего Севера России по причине просадки фундаментов. Эти данные показывают серьезность последствий, связанных с современными изменениями климата в зоне многолетней мерзлоты. Еще три десятилетия назад такой проблемы не существовало. Вопросам устойчивости технических сооружений, строящихся на мерзлых почвогрунтах, не придавалось особого значения. Согласно работам [53, 68], требования норм строительства, заложенные в СНиП, часто носили декларативный характер и не всегда учитывались при проектировании, так как не было опыта негативных последствий. Изменения климата и термического состояния почвогрунтов к настоящему времени со всей очевидностью показали необходимость их учета.

При проектировании технических сооружений можно выбирать с запасом глубину закладки фундаментов с учетом тенденций роста глубины протаивания, но стоимость сооружений при этом будет возрастать не всегда оправданно, поэтому необходима некоторая оптимизация на основе учета планового срока эксплуатации проектируе-

мого сооружения и тенденций роста глубины сезонного протаивания с прогнозом на весь срок его эксплуатации.

Возможны два варианта достижения достаточной прочности фундамента на заданное количество лет. Можно изменить СНиП, увеличив требования по глубине фундаментов относительно современной глубины протаивания (см. табл. 4.2). Если ранее для разных фундаментов в СНиП была заложена надбавка 1, 2 или 4 м относительно глубины протаивания (см. табл. 4.2), то в новом СНиП эту надбавку можно увеличить на 1 – 2 м для сооружений, которые должны стоять в XXI веке согласно прогнозу увеличения протаивания [4]. Но такой подход не будет оптимальным. Изменения климата неравноценны в различных регионах многолетней мерзлоты и будущие изменения могут оказаться различными. Поэтому в некоторых регионах, возможно, будут излишними расходы на необоснованно глубокие фундаменты. Оптимальным был бы, вероятно, подход сохранения СНиП с обязательным требованием применения его с учетом прогноза изменений климата и глубины сезонного протаивания до конца планируемого срока эксплуатации. Практически это бы означало, что к табл. 4.2 в качестве глубины сезонного протаивания применять прогностическое значение H_T на конец срока эксплуатации.

4.5. Изменение глубины сезонного протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов в районах некоторых трубопроводов

Большинство сооружений в зоне многолетней мерзлоты построены на опорах или фундаментах, использующих в качестве основания мерзлый грунт ниже уровня сезонного протаивания. Как показано в разделе 4.2, глубина сезонного протаивания увеличивается вместе с потеплением климата. В результате этого возникают деформации и аварии трубопроводов, проходящих через многолетнюю мерзлоту (рис. 4.6).

Аварии могут сопровождаться выбросами в окружающую среду нефтепродуктов с экологическими и экономическими последствиями.

Как известно [5], 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 [22]. При этом около 21% всех аварий вызваны механическими воздействиями, в том числе связанными с потерей устойчивости фундаментов и деформацией опор [79].

В работе [85] сказано, что изучение современных мерзлотно-климатических изменений на территории России осуществляется преимущественно без учета специфики нефтегазового землепользования и лишь в отдельных публикациях рассматриваются вопросы современных мерзлотно-климатических изменений для разведанных и осваиваемых нефтегазоносных районов.

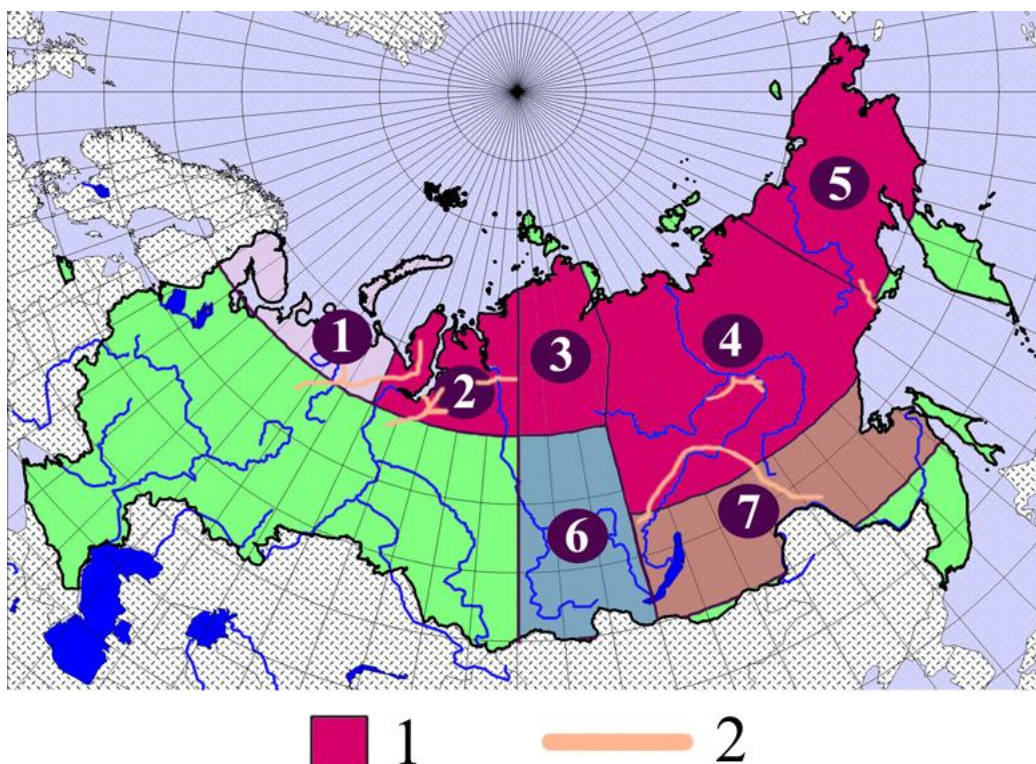


Рис. 4.6. Схематичное изображение некоторых трубопроводов на территории, в которой наблюдается увеличение глубины сезонного протаивания: 1 – районы, в которых показано увеличение глубины сезонного протаивания (см. раздел 3.2): север Западной Сибири, северо-запад Восточной Сибири, Якутия, север Дальнего Востока; 2 – фрагменты некоторых трубопроводов в этих районах

В районах сплошной и прерывистой многолетней мерзлоты Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции расположены преимущественно газовые месторождения [85]. Нефтяные месторождения, находящиеся, как правило, в центральной и южной частях Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, расположены в пределах островной, редкоостровной и реликтовой мерзлоты; последняя погребена на глубинах 100 – 300 м [13, 85, 120].

Негативным последствием деградации многолетней мерзлоты становится ухудшение работы фундаментов сооружений, проектирование которых проводилось без учета возможного глобального потепления климата [89]. По данным [89], за период эксплуатации газопровода Надым – Пунга нарушенная вдоль его трассы зона возросла с 50 до 200 – 400 м.

Дальнейшее строительство трубопроводов должно проводиться с учетом сведений об увеличении глубины сезонного протаивания, полученных ранее разными исследователями и уточненных в настоящей работе на новых данных.

По прогнозам Межправительственной группы экспертов по изменению климата [47] потепление климата будет продолжаться и в будущем, поэтому при эксплуатации, закладке и строительстве новых трубопроводов необходимы оценки тенденций глубины сезонного протаивания почвогрунтов, связанных с изменениями климата, для того чтобы найти наиболее экономичные инженерные решения и по возможности предотвратить деформации и напряжения на трубопроводах и других сооружениях.

Трубопроводы, проходящие в зоне, в которой, как показано в настоящей работе, сезонное протаивание увеличивается, должны находиться под постоянным контролем. Для их безопасной эксплуатации необходимы постоянные наблюдения за температурой почвогрунтов и их обработка.

Выводы

1. Последствиями современных изменений климата является общая тенденция увеличения глубины сезонного протаивания почвогрунтов на обширной территории в четырех крупных районах России.

2. Климатообусловленное увеличение глубины протаивания многолетнемерзлых почвогрунтов создает несоответствие глубины фундаментов в основаниях зданий и сооружений, построенных по СНиП и климату прошлых лет.

3. При эксплуатации старых, а также при закладке и строительстве новых трубопроводов и фундаментов сооружений необходимы оценки тенденций глубины сезонного протаивания почвогрунтов с учетом современных и будущих изменений климата.

ГЛАВА 5. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГОРИМОСТИ ЛЕСОВ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

5.1. Изменения климата и лесные пожары

Нарастающее количество лесных пожаров в мире во многих исследованиях связываются с изменениями климата [124, 126, 131, 136]. В работах также показано увеличение числа пожаров на территории России [95], США и Канады, связанное с потеплением климата.

По данным [95], в России в последнее время ежегодно возникает около 30 000 лесных пожаров и выгорает по 1 – 2 млн. га лесов – 0,2 % лесного фонда. Однако Г. Н. Коровин и А. С. Исаев [62] оценили площадь ежегодных лесных пожаров в 5 – 6 млн. га. В более поздней работе [63] Г. Н. Коровин и Н. В. Зукерт отмечают, что на активно охраняемой территории лесного фонда ежегодно возникает от 12 до 36 тысяч лесных пожаров, охватывающих площадь от 0,5 до 5,2 млн. га.

Г.Н. Коровин и А. С. Исаев [62] считают, что в заселенных равнинных районах России до 98% возгораний возникает по вине человека, а в удаленных северных районах в 50% случаев виноваты грозы. Ежегодно около 5% лесных пожаров перерастают в угрожающе крупные, которые охватывают до 92% всех площадей, пройденных огнем.

Способность леса к возгоранию зависит от метеорологических условий. В связи с этим важно провести оценку изменений этих условий в последние десятилетия для территории России исходя из реальных данных метеорологических станций.

Лесные пожары оказывают разрушительное воздействие на лесные экосистемы, уничтожая, кроме деревьев, еще и фауну, вызывая повреждение почвы и ее эрозию. Это негативное воздействие имеет особое значение в зоне мерзлоты, поскольку повреждения поверхностного слоя почвы и растительности влияют на температурный режим более глубоких слоев почвогрунтов из-за нарушения естественного теплообмена между нижней атмосферой и почвогрунтом.

Пожары приводят к смене растительности и к увеличению глубины оттаивания мерзлотных почв [12]. На глубину оттаивания почвы влияют сила пожара, тип леса и другие факторы. По данным П.М. Матвеева [72, 73], на некоторых территориях после сильных низовых пожаров оттаивание увеличивается примерно в два раза, после слабых – на 8 (15%) [105].

По данным [69], в лесах Лено-Амгинского междуречья почва на горях в среднем оттаяла на 0,3 – 0,8 м глубже (на 0,3 – 0,6 м – в июле и 0,4 – 0,8 м – в августе), чем в лесу.

По наблюдениям [106] в лесах Эвенкии уровень залегания многолетней мерзлоты после средних по силе пожаров в 1,3 – 1,7 раза ниже, чем на не горевших участках. Сохраняется эта разница около 20 лет и тесно связана с темпами восстановления мохово-лишайникового покрова [105].

В зоне распространения многолетней мерзлоты пожары нередко вызывают явления термокарста, солифлюкции [2]. Кроме того, лесные пожары здесь могут способствовать заболачиванию территории [105].

Эмиссии углерода от лесных пожаров повышают концентрацию парниковых газов в атмосфере и тем самым способствуют глобальным изменениям климата.

В целом по России за 1985 – 2004 гг. как количество лесных пожаров, так и лесная площадь, пройденная пожарами, возросли [43] (рис. 5.1).

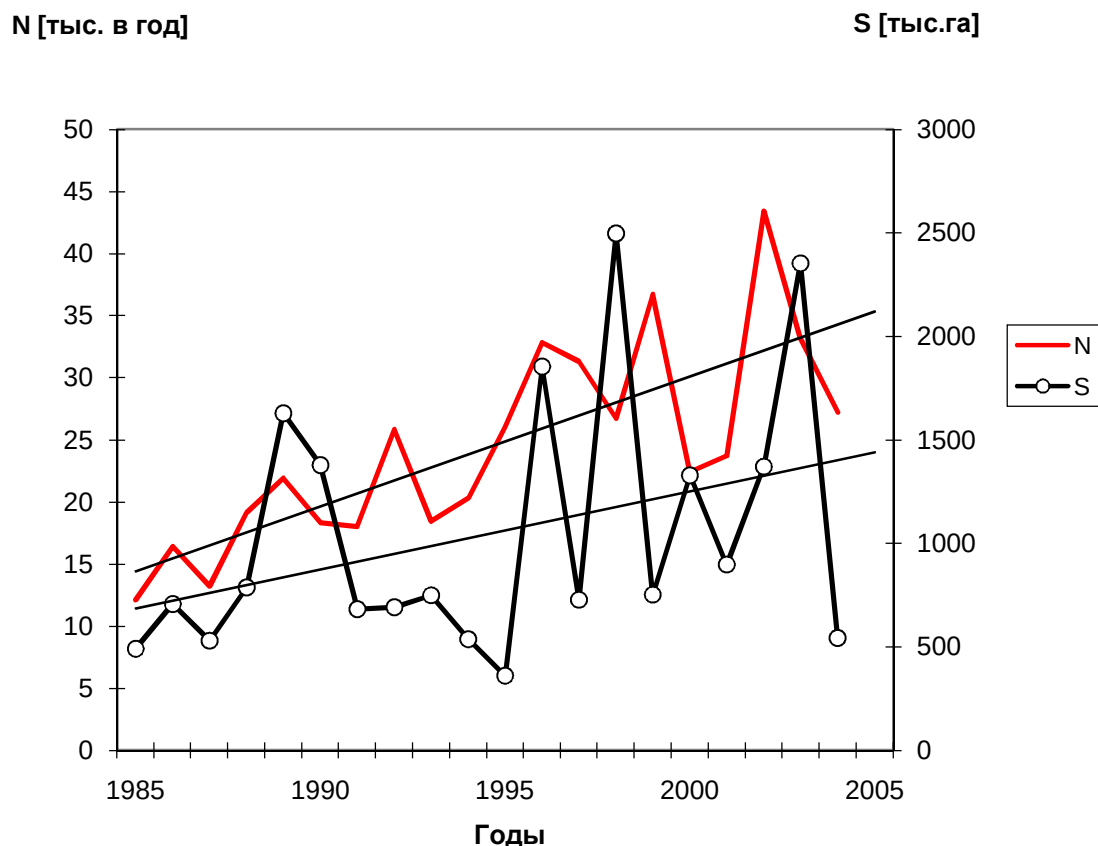


Рис. 5.1. Количество лесных пожаров (N) и лесная площадь (S), пройденная пожарами в 1985 – 2004 гг. в России по данным [43]

Сопоставление фактических данных о лесных пожарах и погодных условий показывает, что горимость лесов в значительной степени определяется погодными условиями, своеобразием ландшафта и комплексом антропогенных факторов [108].

Приведенные на рис. 5.1 сведения о лесных пожарах не являются полными. Регулярные наблюдения за лесными пожарами осуществляются только на активно охраняемой территории. На неохранных территориях малонаселенных районов лесные пожары не регистрируются и не тушатся [63]. По отдельным данным государственных учетов лесного фонда страны практически половина всех гарей приходится на неохранные территории, что свидетельствует об огромных масштабах воздействия огня на структуру и состояние лесов Сибири. Количество гарей в этих районах в три раза больше, чем на активно охраняемой территории лесного фонда. По данным статистической отчетности лесной службы, за последние 50 лет на активно охраняемой территории пожарами пройдено около 60 млн. га, в том числе лесных земель – 42,3 млн. га. С учетом горимости лесов в неохранных районах общая пройденная огнем площадь в лесном фонде России за этот период оценивается примерно в 100 – 120 млн. га, в том числе площадь пройденных пожарами лесных земель – в 80 – 90 млн. га [63].

Последствия изменений климата в лесном хозяйстве далее рассматриваются преимущественно в южной половине Сибири, так как в главе 1 было показано, что из всех районов на территории многолетней мерзлоты России наибольшие изменения климата произошли в южной половине Сибири. Фактические данные о пожарах на юге Сибири подтверждают общую тенденцию роста числа возникающих пожаров и площади выгоревших лесов. Так, в Читинской области (рис. 5.2) за последние десятилетия возросло как число пожаров, так и средняя площадь каждого пожара. Фактические данные взяты из [43].

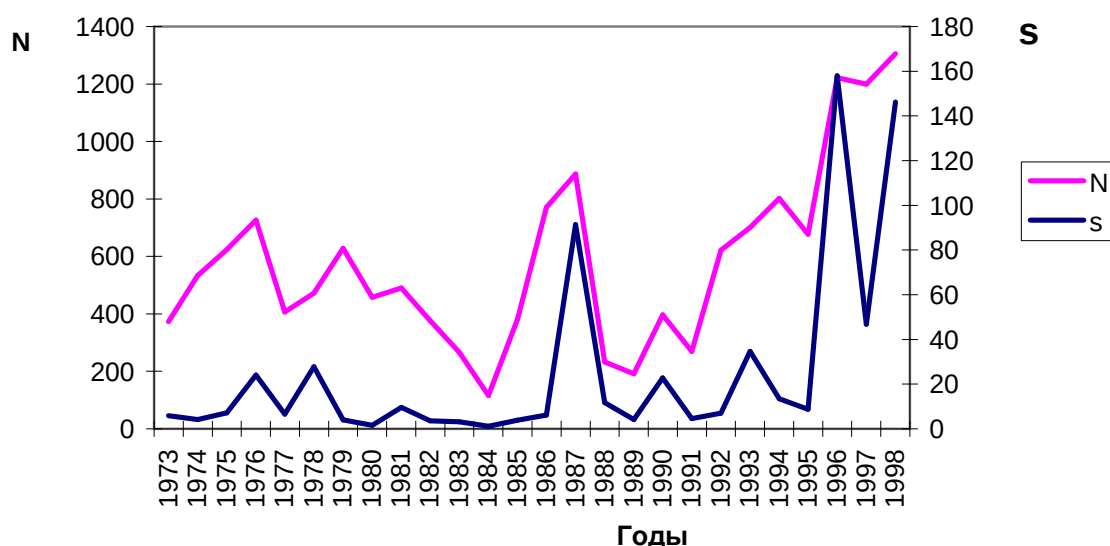


Рис. 5.2. Число лесных пожаров (N) и средняя площадь пожара (S) в Читинской области

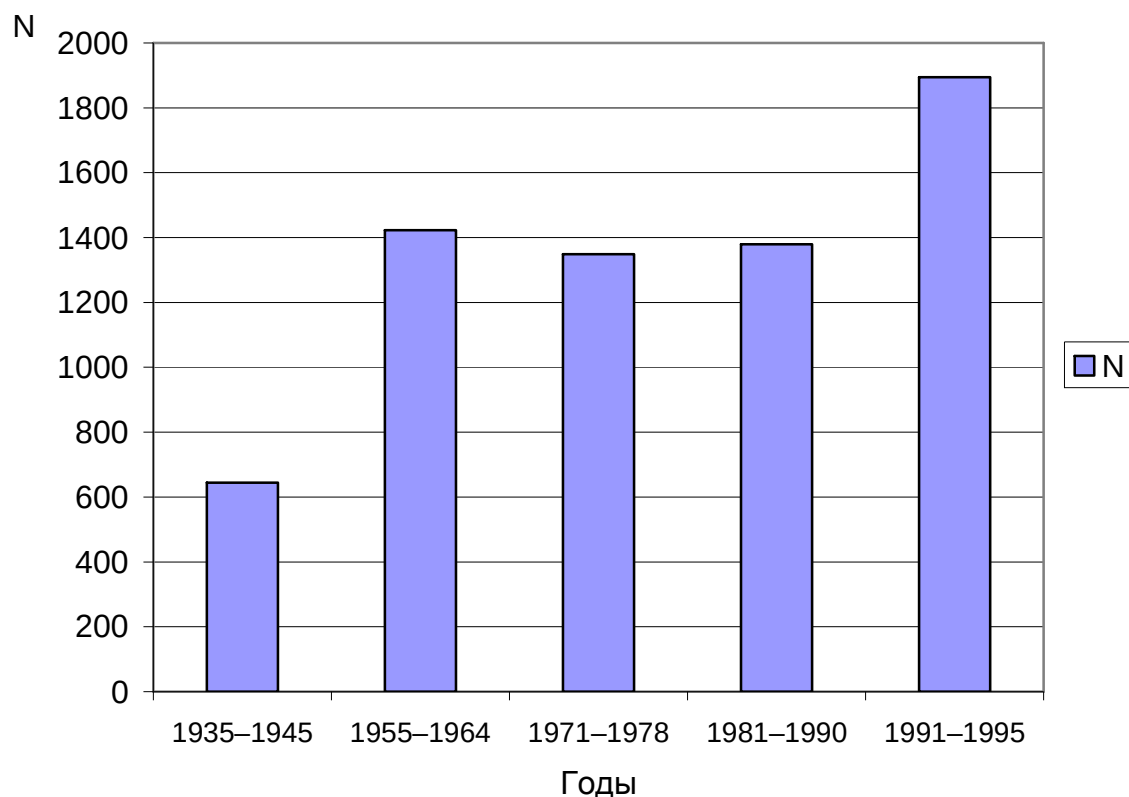


Рис. 5.3. Среднегодовое число лесных пожаров в Иркутской области по интервалам лет

В [43] приводится среднегодовое число лесных пожаров за более длительный ряд лет по Иркутской области. По этим данным с 1935 по 1995 г. в Иркутской области сохраняется тенденция роста среднегодового числа пожаров (рис. 5.3).

Известно, что пожароопасная обстановка в лесах создается при сухой и жаркой погоде и нарастает с увеличением продолжительности периода с такими погодными условиями. Изменения климата приводят к изменению условий, способствующих горению, поэтому в следующем разделе рассматриваются оценки горимости леса по метеорологическим данным.

При сложившейся высокой пожарной опасности возникновение пожара в лесу может произойти от молнии или от неосторожного обращения с огнем человека. Пожары чаще всего возникают на участках лесов, посещаемых людьми вблизи населенных пунктов и автомобильных и железных дорог [11].

Для борьбы с пожарами очень важно оценивать возможность их возникновения до их возникновения, чтобы заблаговременно активизировать все средства предупреждения возгораний.

5.2. Пожароопасность лесов и метод ее оценки по метеорологическим данным

Для оценки степени пожароопасности леса в зависимости от метеорологических условий используется индекс горимости леса, который вычисляется по формуле, предложенной В. Г. Нестеровым [65, 101]. Индекс горимости G вычисляется для текущих суток календарного года следующим образом:

$$G = \sum_i (T_i \times d_i),$$

где T_i – температура ($^{\circ}\text{C}$) воздуха в полдень, а d_i – дефицит точки росы в полдень; суммирование производится по совокупности текущих и всех предшествующих идущих подряд бездождных суток (т.е. с осадками меньше 2,5 мм/сут). Этот индекс может быть вычислен на основе данных срочных наблюдений, проводимых на метеостанциях сети Росгидромета. Индекс характеризует потенциальную опасность возгорания леса, связанную с метеорологическими условиями.

Для качественных оценок удобно пользоваться не значениями индекса, а шкальными значениями – классами горимости. Их определение по значениям индекса горимости [101] дано в табл. 5.1.

Гидрометеорологическая обстановка, которой соответствует горимость IV и V классов, включена в список особо опасных явлений. Количество суток N за календарный год или за какой-либо период года (например, сезон), имевших заданный класс индекса горимости леса (или класс индекса горимости которых был не ниже заданного), часто употребляется в климатических обобщениях.

Таблица 5.1

Классы горимости		
Класс горимости	Диапазон значений индекса горимости, $(^{\circ}\text{C})^2$	Горимость (качественная оценка)
I	0 – 300	Отсутствует или малая
II	301 – 1000	Средняя
III	1001 – 4000	Высокая
IV	4001 – 10000	Особо опасная
V	> 10000	Чрезвычайная

Сравнение N с фактическими данными о лесных пожарах выполнено далее на примере Сибирского федерального округа. На рис. 5.4 показаны многолетние изменения лесной площади, пройденной пожа-

рами [43] и вычисленного автором числа дней в году с высокой горимостью по индексу Нестерова ($G > 1000$).

Индекс Нестерова вычислялся по данным 190 метеорологических станций Сибирского федерального округа на каждый день. По каждой станции определялось число дней с высокой горимостью ($G > 1000$) и среднее число дней N по всем станциям округа с высокой горимостью. Аналогичные расчеты выполнены отдельно по каждому субъекту Федерации, входящему в Сибирский федеральный округ.

Коэффициент корреляции между лесной площадью (S), пройденной пожарами в Сибирском федеральном округе, и числом дней (N) в году с высокой потенциальной горимостью леса на той же территории составил 0,53 за 1986 – 2004 гг. Достоверность коэффициента корреляции выше 95%. Значимая положительная корреляция подтверждает применимость индекса Нестерова на территории большой площади. Аналогичные расчеты индекса и сопоставления с фактическими данными о пожарах по отдельным более мелким регионам Сибирского федерального округа (Алтайский край, Красноярский край, Читинская область, Иркутская область) показали совпадение только общей тенденции расчетных и фактических данных и несовпадение погодичных значений.

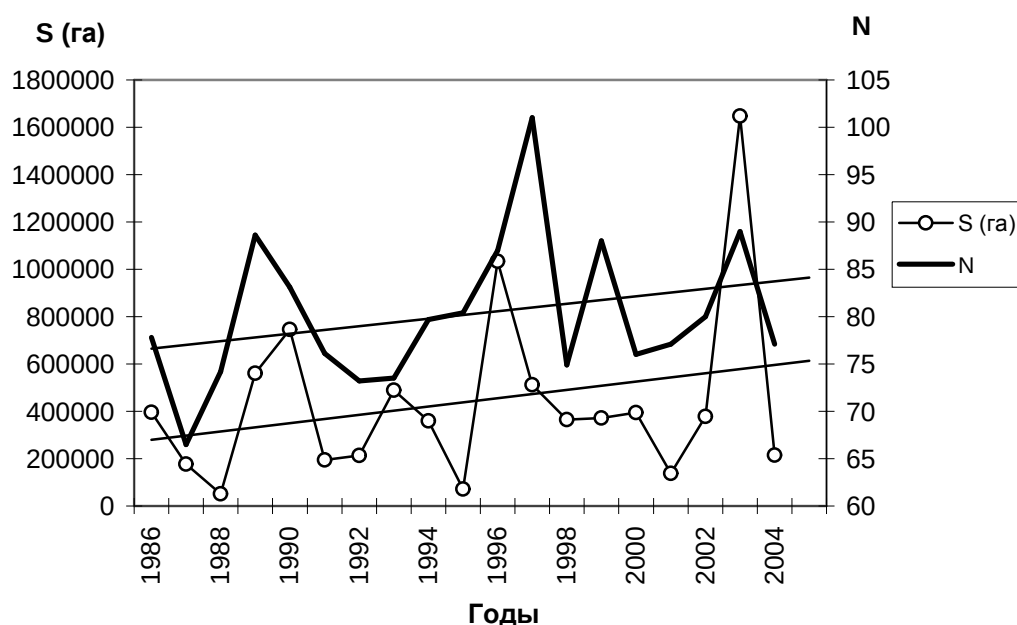


Рис. 5.4. Лесная площадь (S), пройденная пожарами в Сибирском федеральном округе, и число дней (N) в году с высокой потенциальной горимостью леса по индексу Нестерова

Можно назвать две причины, по которым не следует ожидать полного соответствия данных о фактических пожарах и расчетных

значений потенциальной опасности лесных пожаров. Индекс Нестерова отражает совокупность благоприятных или неблагоприятных метеорологических условий для пожаров. Соответствующие метеорологические условия являются необходимым, но недостаточным условием для возникновения лесного пожара. Пожар возникает и развивается при наличии еще двух факторов: наличие горючих материалов (леса) и наличие источника огня (возгорания). На возгорание лесных массивов дополнительно влияют породный состав, возраст, санитарное состояние лесных насаждений. Таким образом, лесной пожар – явление многофакторное. Применимость индекса горимости в лесоохранной работе должна оцениваться в каждом регионе отдельно, и выводы могут быть различными в зависимости от наличия в регионе всех указанных условий и от масштабов пространственного обобщения.

Вторая причина расхождений заключается в различиях методов получения фактических данных о лесных пожарах. По сведениям Министерства природных ресурсов на основе визуальных наблюдений, площадь лесных земель, пройденная огнем, в 2004 году составила 442 тыс. га. По сведениям Всемирного центра мониторинга пожаров (г. Фрайбург, Германия) на основе спутниковых наблюдений, площадь пожаров на природных территориях России в 2004 году составила 5 млн 934 тыс. га, или в 13,5 раза больше [123]. Противоречие неслучайное, и, по мнению [43], реальные масштабы горимости лесов России и размеры наносимого огнем ущерба до настоящего времени не установлены.

Регулярные наблюдения за лесными пожарами ведутся только в зоне активной охраны лесов, охватывающей 2/3 общей площади лесного фонда. В северных районах Сибири и Дальнего Востока, охватывающих 1/3 лесного фонда, учет пожаров практически отсутствует. Заниженные значения, по данным Министерства природных ресурсов, частично связаны с тем, что огромные необжитые районы России остаются без наблюдений, а со спутника оценка идет по всей площади. С другой стороны, спутниковые данные о пожарах могут оказаться завышенными, поскольку не являются абсолютно точными и имеют тенденцию к завышению. В этом методе малые пожары иногда принимают за большие.

Сравнение спутниковых данных о лесных пожарах и расчетных данных индекса Нестерова проводилось на примере территории Сибири. На сайте Байкальского регионального информационного компьютерного центра <http://geol.irk.ru/bricc.htm> ежедневно выставляются космоснимки спутника EOS-AM-1 (TERRA), принимаемые станцией, расположенной в г. Иркутске. Радиус обзора – 3000 км. Используются данные прибора MODIS. Более высокое разрешение прибора MODIS спутника TERRA (250 м на точку), по сравнению с более ранним прибором AVHRR спут-

ника NOAA (1100 м на точку), позволяет проводить анализ пожарной обстановки. Для цифрового детектирования пожаров используется стандартный алгоритм, разработанный NASA для данных MODIS, – MOD14. Описание алгоритма опубликовано в [122, 125, 130].

Алгоритм позволяет выделять участки с лесными пожарами и их географические координаты. Как правило, возникший пожар продолжается со смещением длительное время, меняя свои координаты. За сутки спутник делает три витка, поэтому все продолжающиеся пожары фиксируются трижды. Для получения количественной оценки масштабов лесных пожаров можно пожароопасный сезон года характеризовать числом очагов пожаров (N_f) на фиксированной площади (например, в одноградусном квадрате географической сетки):

$$N_f = (\sum f) / 3,$$

где f – зафиксированный спутником очаг пожара на заданной территории; число 3 учитывает троекратное фиксирование каждого очага за три пролета спутника в сутки. По данным, приведенным на сайте <http://geol.irk.ru/bricc.htm>, вычислялось число пожаров в узлах регулярной географической сетки $1 \times 1^\circ$ в зоне видимости приемной станции Иркутск от 60° до 160° в.д. и в широтной зоне от южных границ России до широты 65° . Суммирование проводилось за сезон май–август, как наиболее опасный в пожарном отношении интервал года.

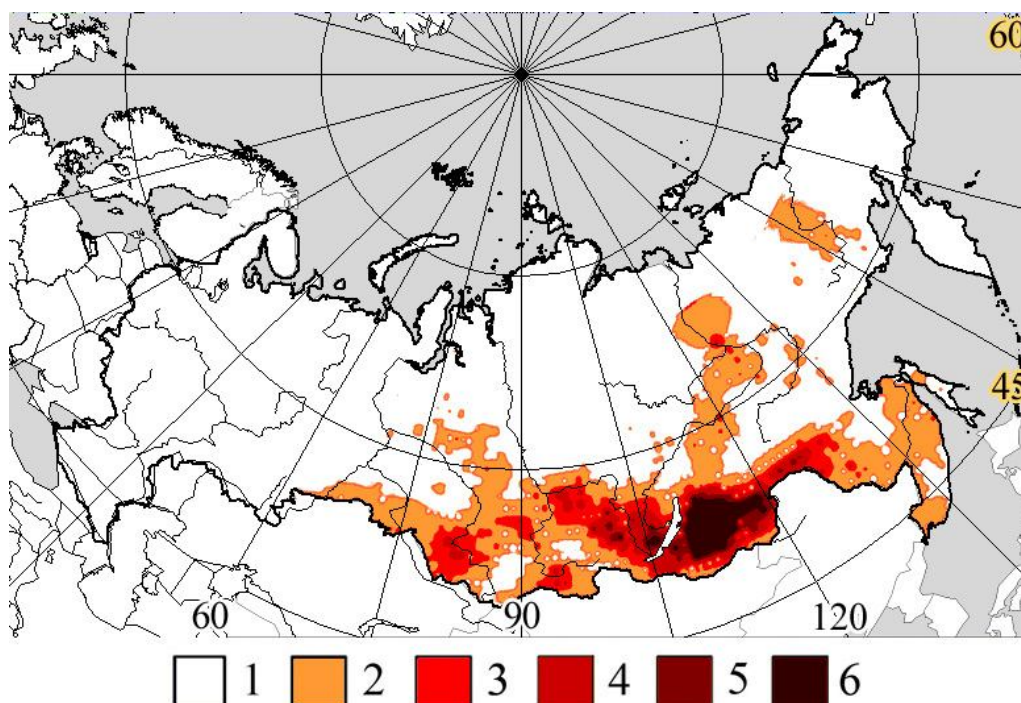


Рис. 5.5. Число пожаров за май–август в 2003 г. по спутниковым данным по квадратам географической сетки $1 \times 1^\circ$, Сибирь: 1 – $0 < N_f \leq 10$; 2 – $10 < N_f \leq 50$; 3 – $50 < N_f \leq 100$; 4 – $100 < N_f \leq 200$; 5 – $200 < N_f \leq 300$; 6 – $300 < N_f \leq 400$

На рис. 5.5 показана карта числа пожаров в 2003 году в Сибири по спутниковым данным.

На карте рис. 5.5 видно, что на урбанизированных территориях (юг Сибири и в долинах рек Лена, Алдан, Колыма) число пожаров больше, чем в малонаселенных районах. За те же месяцы (май–август) 2003 года по наблюдениям на метеорологических станциях вычислены ежедневные значения индекса Нестерова и подсчитано на каждой станции число дней (n) с высокой ($G>1000$) потенциальной горимостью леса за пожароопасный сезон. Результаты показаны на карте рис. 5.6.

Сопоставление карты рис. 5.6 с картой рис. 5.5 пространственного распределения лесных пожаров по спутниковым данным показывает, что фактические пожары возникают в местах с высокой потенциальной горимостью по индексу Нестерова, но не всегда высокая потенциальная горимость переходит в пожар.

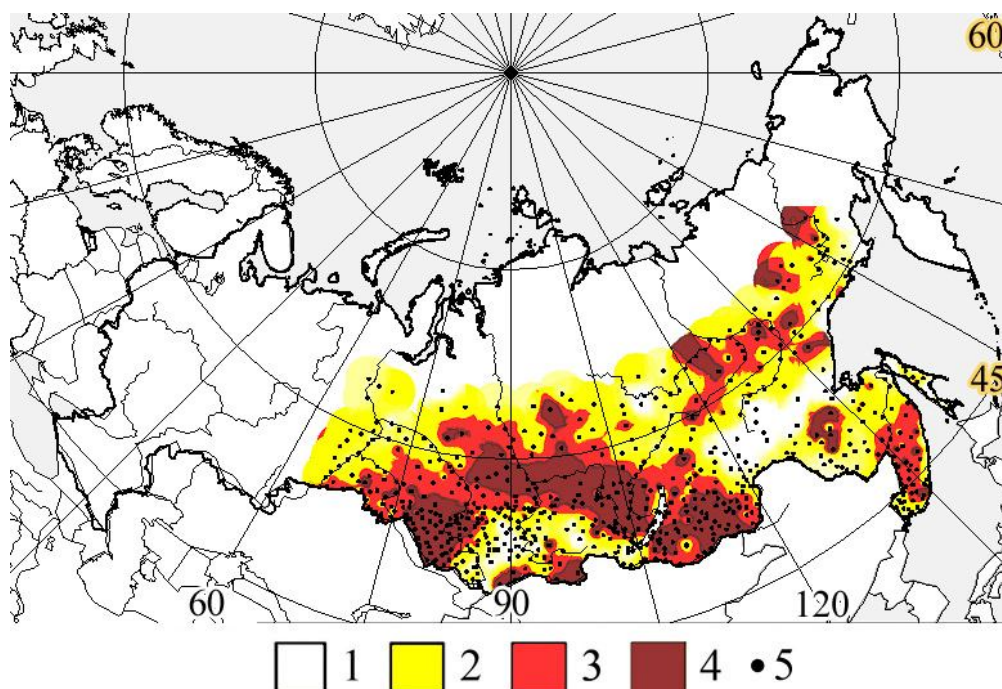


Рис. 5.6. Число дней за май–август 2003 года с опасной потенциальной горимостью леса $G>1000$ по данным на метеорологических станциях, Сибирь: 1 – $30 \leq n < 60$; 2 – $60 \leq n < 70$; 3 – $70 \leq n < 80$; 4 – $80 \leq n < 100$; 5 – станции

Это согласуется с выводами погодичного анализа пожаров в Сибирском федеральном округе, представленного выше, о том, что индекс описывает одно необходимое условие для возникновения лесного пожара, но не учитывает других важных условий – наличие леса и наличие источника огня.

Преимуществом индекса является то, что он позволяет оценить пожароопасность на неохраямой территории, где пожары в лесах остаются не замеченными или нет спутниковых данных о пожарах. Кроме того, мониторинг оценок потенциальной горимости леса по ме-

теоретическим данным позволяет прогнозировать вероятность возникновения лесных пожаров до их возникновения и проводить организационные предупредительные меры.

5.3. Изменение горимости леса за последние три десятилетия на территории России

Оценки потенциальной горимости леса были получены по данным 1612 метеорологических станций России за 1976 – 2005 гг. На каждой станции производился подсчет числа суток за сезон и за год с высокой горимостью ($G > 1000$). В результате этих расчетов по каждой станции был получен ряд погодичных значений числа суток с классами индекса III и IV. Изменение количества суток N с заданным классом индекса горимости оценивалось по относительному изменению количества суток с заданным классом. За многолетний период времени от года t_0 до года t_1 по значениям N строится уравнение линейного тренда $N^*(t)$ и по уравнению тренда вычисляются значения количества суток с заданным классом индекса горимости в начале периода $N^*(t_0)$ и в конце периода $N^*(t_1)$. Отношение их разности к значению $N^*(t_0)$, выраженное в процентах, является характеристикой изменения потенциальной горимости леса за время от t_0 до t_1 :

$$\Delta_{\%} N^* = 100[N^*(t_1) - N^*(t_0)] / N^*(t_0)$$

Изменение горимости лесов за 1976 – 2005 гг. оценивалось как изменение в процентах полученного аппроксимированного значения для 2005 г. к аппроксимированному значению для 1976 года. Такие оценки были получены для весны (апрель – май), лета (июнь – август) и осени (сентябрь – октябрь), а также для года в целом.

Результаты нанесены на карты рис. 5.7 – 5.10. На этих рисунках градации изменений 0% означает отсутствие изменений как по метеорологическим условиям, так и по причине отсутствия леса в тундровой зоне.

В *весенний период* (рис. 5.7) на Европейской территории России за 1976 – 2005 гг. увеличение числа суток с высокой пожароопасностью составляет преимущественно до 50%.

Увеличение числа суток с пожароопасностью (на 25 – 50%) на ЕТР наблюдается на широтах 55 – 65°с.ш. Такие же изменения числа пожароопасных дней весной произошли на территории криолитозоны на юге Сибири (в верховьях Оби, Енисея и в Предбайкалье) и Дальнего Востока (Приамурье и Камчатка). При этом на некоторых станциях число пожароопасных дней возросло на 50 – 75%. Перечисленные районы, кроме Камчатки, относятся к зоне тайги, лиственных и хвойных лесов. Понижилась пожароопасность весной на Южном Урале, на Кольском полуострове и прилегающей территории, а также на широтах 60 – 65°с.ш. в Сибири и на Дальнем Востоке.

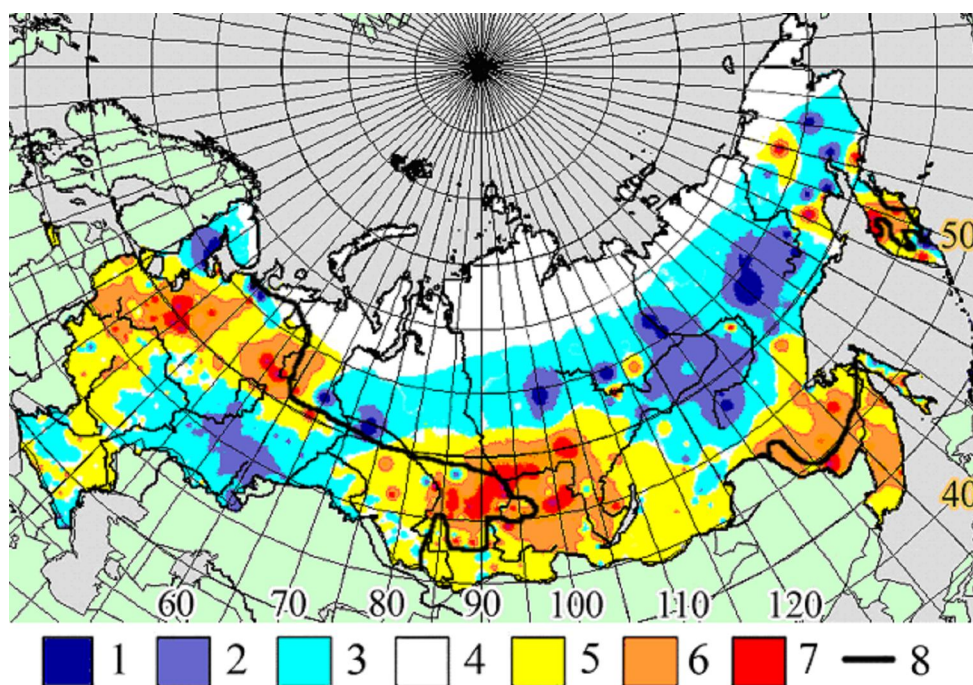


Рис. 5.7. Увеличение числа суток с высокой горимостью в весенний период (апрель – май) за 1976 – 2005 гг., %: 1 – $-75 < \Delta_{\%} N \leq -50$; 2 – $-50 < \Delta_{\%} N \leq -25$; 3 – $-25 < \Delta_{\%} N < 0$; 4 – $\Delta_{\%} N = 0$; 5 – $0 < \Delta_{\%} N < 25$; 6 – $25 \leq \Delta_{\%} N < 50$; 7 – $50 \leq \Delta_{\%} N < 75$; 8 – южная граница многолетней мерзлоты

Летом (рис. 5.8) на ЕТР число пожароопасных дней за 1976 – 2005 гг. увеличилось на 1 – 24% в низких и средних широтах, а в высоких широтах понизилась на 1 – 24%. Относительный рост числа суток с высокой горимостью на 1 – 24% наблюдается на территории криолитозоны в Сибири между Обью и Енисеем южнее 65° с.ш., в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке – южнее $60 - 65^{\circ}$ с.ш. В более высоких широтах Сибири отмечается понижение на 1 – 24%.

В осенний период (рис. 5.9) за 1976 – 2005 гг. увеличение на 25 – 50% числа суток с высокой пожароопасностью произошло в средних и высоких широтах ЕТР, на юге и востоке Западной Сибири, в Приамурье, на Камчатке. Понижение на 25 – 50% числа суток с высокой пожароопасностью произошло осенью в верховье Енисея и Ангары, в бассейне Лены. За исключением Камчатки с ее тундровой растительностью все остальные районы повышения пожароопасности, обусловленные изменением климата, относятся к зоне тайги и хвойных лесов.

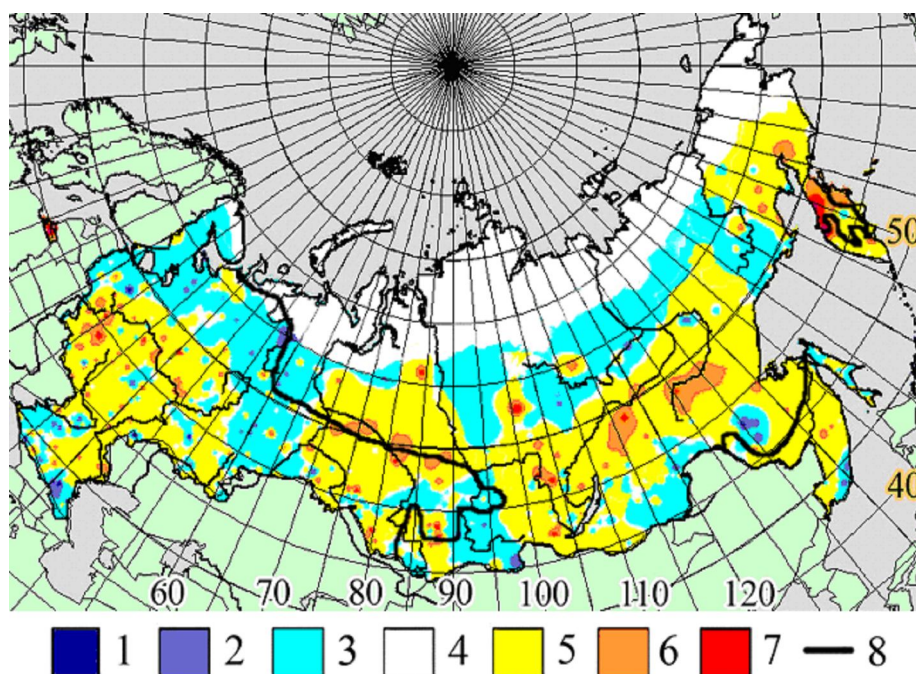


Рис. 5.8. Увеличение числа суток с высокой горимостью в летний период (июнь – август) за 1976 – 2005 гг., %: 1 – $-75 < \Delta_{\%}N \leq -50$; 2 – $-50 < \Delta_{\%}N \leq -25$; 3 – $-25 < \Delta_{\%}N < 0$; 4 – $\Delta_{\%}N = 0$; 5 – $0 < \Delta_{\%}N < 25$; 6 – $25 \leq \Delta_{\%}N < 50$; 7 – $50 \leq \Delta_{\%}N < 75$; 8 – южная граница многолетней мерзлоты

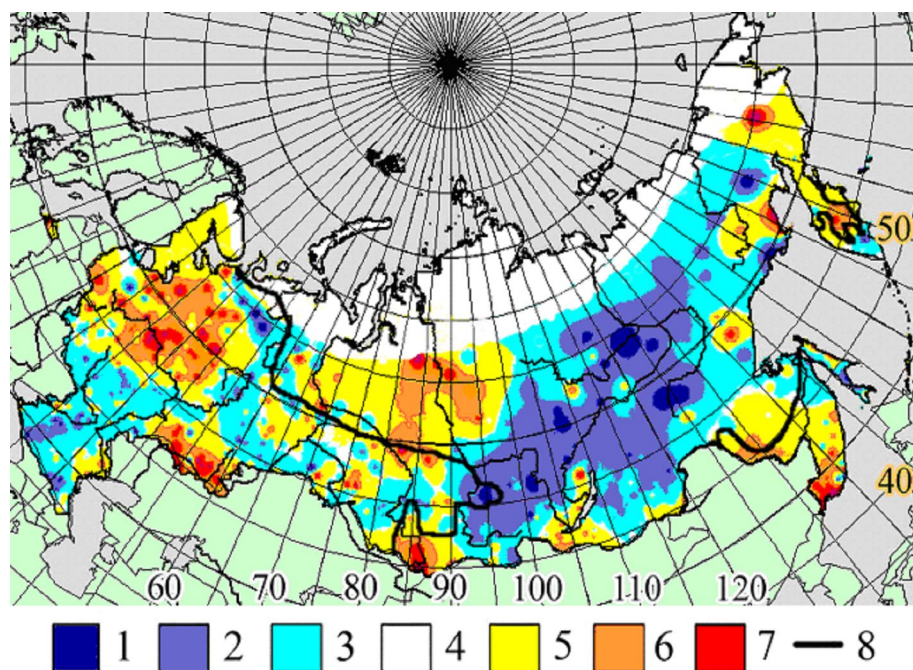


Рис. 5.9. Увеличение числа суток с высокой горимостью в осенний период (сентябрь – октябрь) за 1976 – 2005 гг., %: 1 – $-75 < \Delta_{\%}N \leq -50$; 2 – $-50 < \Delta_{\%}N \leq -25$; 3 – $-25 < \Delta_{\%}N < 0$; 4 – $\Delta_{\%}N = 0$; 5 – $0 < \Delta_{\%}N < 25$; 6 – $25 \leq \Delta_{\%}N < 50$; 7 – $50 \leq \Delta_{\%}N < 75$; 8 – южная граница многолетней мерзлоты

За год в целом (рис. 5.10) в 1976 – 2005 гг. увеличение числа суток с высокой горимостью примерно на 10 – 20% произошло на всех широтах на ЕТР, за исключением ее северной части. Там пожароопасность понизилась на 10–20%. Повышение на 10 – 40% произошло почти везде в южной половине Сибири и Дальнего Востока. Понижение числа пожароопасных дней на 10 – 20% наблюдалось в широтной зоне 62 – 67°с.ш. на востоке Восточной Сибири и между реками Лена и Колыма.

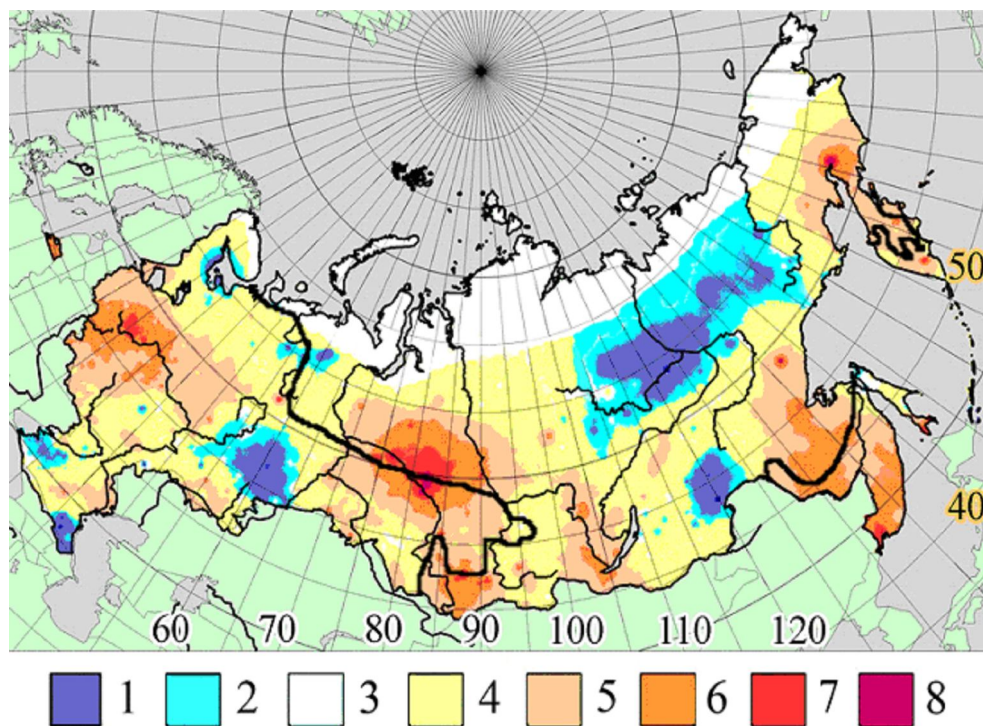


Рис. 5.10. Увеличение числа суток в календарном году с высокой горимостью за 1976 – 2005 гг., %.: 1 – $-20 < \Delta_{\%} N \leq -10$; 2 – $-10 < \Delta_{\%} N < 0$; 3 – $\Delta_{\%} N = 0$; 4 – $0 < \Delta_{\%} N \leq 10$; 5 – $10 < \Delta_{\%} N \leq 20$; 6 – $20 < \Delta_{\%} N \leq 30$; 7 – $30 < \Delta_{\%} N \leq 40$; 8 – $40 < \Delta_{\%} N \leq 50$

Выполненный анализ показал, что за последние три десятилетия в связи с изменением климата во все теплые сезоны года потенциальная горимость лесов повысилась в южной части зоны многолетней мерзлоты. При этом почти везде повышение горимости произошло в местах, занятых лесами. Наибольшее обострение ситуации сложилось в южной половине Сибири. В этих районах для лесных пожаров складываются все необходимые условия (сухая жаркая погода, наличие лесов и наличие антропогенных источников возгорания).

Пожары в обширных лесных массивах Сибири мало поддаются тушению, поэтому обычно, если выдался один сезон, способствующий возникновению пожаров, то заканчиваются пожары только в

конце осени. Поэтому весенние и летние пожары приводят к наибольшим потерям лесного фонда.

Потери лесного фонда в зоне распространения мерзлоты могут оказать негативное влияние на термическое состояние почвогрунтов этой зоны и усилить их современную деградацию.

Выводы

1. Выявлено, что фактические пожары возникают в местах с высокой потенциальной опасностью по индексу Нестерова, но не всегда высокая потенциальная опасность переходит в пожар (вывод сделан при сопоставлении результатов с картой пространственного распределения лесных пожаров по спутниковым данным). Индекс Нестерова дает возможность оценивать пожароопасность на неохраямой территории, где пожары в лесах остаются не замеченными или нет спутниковых данных о пожарах.

2. За последние три десятилетия (1976 – 2005 гг.) во все сезоны теплой части года потенциальная горимость лесов преимущественно повысилась. В местах, занятых тайгой и хвойными лесами, повышение горимости произошло почти повсеместно. Наибольшее обострение ситуации сложилось в южной половине Сибири. В этих районах для лесных пожаров складываются все необходимые условия (сухая жаркая погода, наличие лесов и наличие антропогенных источников возгорания).

3. Произошло повышение пожароопасности за период 1976 – 2005 гг. примерно на 10 – 20% на всех широтах на ЕТР, за исключением ее северной части. Там пожароопасность понизилась на 10 – 20%. Повышение на 10 – 40% произошло почти везде в южной половине Сибири.

ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА РЕКРЕАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ЮГА ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

6.1. Основные показатели климатической комфортности человека

Рассматриваемая зона многолетней мерзлоты охватывает около 2/3 территории России. На этой территории проживает значительное количество населения, которое в основном сконцентрировано в южной половине Сибири, вблизи границ криолитозоны. Специфический климат в этом районе часто является лимитирующим фактором, а его изменения чувствительно сказываются на условиях проживания человека в этом регионе. Климатическая комфортность проживания человека является важной характеристикой, влияющей на общее самочувствие человека и его здоровье. Потепление климата может оказать благоприятное влияние на развитие туризма и сферы отдыха. До настоящего времени такие последствия на территории многолетней мерзлоты остаются не изученными. Поэтому биоклиматические последствия изменений климата заслуживают отдельного рассмотрения для обозначенной территории.

Влияние климата на комфортность самочувствия человека принято оценивать на основе специальных комплексных индексов и характеристик, которые отражают влияние погоды и климата на ощущения человека и вычисляются по данным наблюдений метеорологических станций. Последствием изменения климата являются долговременные изменения упомянутых индексов. Стремление защититься от неблагоприятных погодных условий или, напротив, использовать благоприятные силы природы для улучшения своего собственного благополучия всегда было свойственно человеку. Погодно-климатические условия являются одним из факторов окружающей среды, во многом определяющих условия проживания, образ занятий и комфортность существования человека на протяжении всей его жизни. Особенно велико значение погоды и климата для здоровья. По оценкам некоторых ученых вклад погодно-климатических особенностей в состояние здоровья человека составляет около 20% [54]. Этот вклад зависит на 50% от образа жизни, на 20% – от индивидуальной чувствительности и на 10% – от уровня здравоохранения.

В работе [37] отмечено, что на Дальнем Востоке, и в Еврейской автономной области в частности, наблюдаются повышенные заболеваемость и смертность населения (в том числе младенческая) и меньшая по сравнению со средними российскими показателями продолжи-

тельность жизни вследствие сложного сочетания жизнеобеспечивающих природных условий, в первую очередь климатических.

Эффективная адаптация человеческого организма к климату необходима для обеспечения состояния физического комфорта и выполнения физической и умственной работы без повышенной утомляемости. Комфортностью климата определяются климатические рекреационные ресурсы местности. Условие комфортности климата и его рекреационного ресурса базируется на понятии физиологического комфорта, который возникает тогда, когда складываются такие условия, при которых терморегуляторная система организма испытывает наименьшее напряжение [54].

Во второй половине XIX века доказано влияние климата и погоды на самочувствие и различные заболевания людей [54]. В период значительных изменений климата последних десятилетий [128] возникла новая проблема – адаптация человека к новым условиям среды обитания. Проблемы влияния изменений климата на человека имеют важное место в работе Всемирной метеорологической организации, которая координирует исследования естественных изменений климата в крупных городах и промышленных районах, где наблюдается нарушение экологического равновесия, оказывающего существенное влияние на человека [46].

Изменение теплового режима воздуха вызывает изменения в процессе теплообмена человека с окружающей средой. Субъективное ощущение климатического комфорта человека зависит еще от влажности воздуха. При повышении влажности воздуха трудно адаптироваться к жаре и усиливается действие холода. Влияние ветра проявляется по-разному. При низких температурах ветер усиливает теплоотдачу, что может привести к переохлаждению организма. Зимой в средних широтах ветер понижает сопротивляемость организма, а летом – повышает. Сильный ветер оказывает давление на поверхностные ткани организма и затрудняет дыхание.

Изучению влияния климатических факторов на здоровье человека в разных районах посвящено много работ. Менее изученным является влияние современных изменений климата на изменение климатической комфортности.

В исследовании [37] рассмотрена Еврейская автономная область и отмечено, что исследование пространственно-временных особенностей динамики уровня климатической дискомфортности до сих пор не проводилось.

Изменения климата приводят к изменению частоты появления тех или иных погодных условий или сочетаний средних значений и амплитуды колебаний метеорологических величин. Изменения климата могут приводить к появлению таких условий комфортности или дис-

комфорта, которые ранее не встречались на заданной территории. Меняющийся климат оказывает многостороннее влияние на самочувствие человека, границы комфортных погодных условий очень ограничены и часто имеют региональные различия, связанные со сложившимся региональным укладом жизни и привычками. В данном разделе ставилась задача получения оценок региональных тенденций долговременных изменений комфортности проживания человека и условий для отдыха в условиях меняющегося климата.

Для различных видов отдыха необходимы различные комфортные климатические условия. Различают комфортные условия теплого и холодного периодов года. Биоклиматические индексы в физическом отношении характеризуют особенности температурно-влажностной структуры среды и являются косвенным индикатором состояния теплового поля, окружающего человека. Немаловажное значение для ощущения комфортного отдыха имеет безоблачная погода.

В зависимости от сочетания элементов, входящих в биоклиматические индексы, их условно можно разделить на температурно-влажностные, температурно-ветровые, температурно-влажностно-ветровые и т.д. Поскольку основной составляющей индексов является температура воздуха, то учет эффекта воздействия относительной влажности, скорости ветра, солнечной радиации и т.д. выражается в температурной поправке к температуре наружного воздуха, учитывающей теплоощущения человеческого организма и состояние окружающей среды [54].

В работе использовались основные биоклиматические показатели для летнего и зимнего периодов, а также общие показатели для года в целом. Выбор показателей осуществлен в соответствии с рекомендациями публикаций [10, 37, 54, 58].

Показатели зимнего периода

В зоне распространения многолетней мерзлоты климат характеризуется суровыми зимами. Суровость зим наиболее часто оценивается по индексу Бодмана [54] или по значениям приведенной температуры, предложенной К.Ш. Хайруллиным и В.Н. Адаменко [3]. Оба индекса относятся к группе индексов холодового стресса, в них эффект теплоощущения и дискомфорта уточняется поправкой на скорость ветра.

Индекс Бодмана в баллах характеризует жесткость погоды зимой, он вычисляется по данным о температуре и скорости ветра:

$$B = (1 - 0,04t) \times (1 + 0,272v),$$

где t – среднесуточная температура воздуха в $^{\circ}\text{C}$; v – скорость ветра в м/с;

В зависимости от величины индекса принято считать: $B < 1$ – не суровая погода; $1 < B < 2$ – мало суровая погода; $2 < B < 3$ – умеренно суровая погода; $3 < B < 4$ – суровая погода; $4 < B < 5$ – очень суровая погода; $5 < B < 6$ – жестко суровая погода; $B > 6$ – крайне суровая погода.

Приведенная температура по Хайруллину–Адаменко в °C вызывает такое значение, при котором теплотери человека зимой при некоторой температуре воздуха с учетом скорости ветра равны теплотериям в условиях безветрия. Приведенная температура рассчитывается по формуле [58]:

$$t_{\text{прив}} = t_{\text{в}} - 8,2\sqrt{V},$$

где $t_{\text{прив}}$ – приведенная температура, °C; $t_{\text{в}}$ – фактическая температура воздуха, °C; V – скорость ветра м/с.

Приведенная температура используется для оценки суровости зимнего периода с точки зрения его дискомфорта [58]. При наличии ветра ощущение холода усиливается.

Во все сезоны года дополнительным условием ощущения комфорта погоды является солнечная погода. У большинства людей солнечные дни, помимо позитивного физиологического воздействия, вызывают положительные эмоции [58] и способствуют ощущению комфорта погоды. Однако летом этот показатель не всегда правильно отражает комфортность ощущения погоды. В дни с избыточно жаркой погодой, когда прямые солнечные лучи усиливают перегрев, более комфортными становятся малооблачные условия. В связи с неопределенностью значения солнечных условий для комфорта ощущения летней погоды далее показатель солнечной погоды будет рассчитан только для зимних условий. Зимой солнечная погода наиболее благоприятна для отдыха и туризма [58], особенно в условиях суровых зим Сибири.

Выделение солнечных дней осуществлялось по данным наблюдений за облачностью на метеорологических станциях. Солнечными считались сутки со среднесуточными значениями общей облачности ($N_{\text{об}}$) 0 – 3 балла: $0 \leq N_{\text{об}} \leq 3$.

Показатели летнего периода

Летом теплоощущения человека определяются сочетанием температуры и влажности воздуха, скоростью ветра и солнечной радиацией. Часто используют упрощенные показатели. Так, например, эффективная температура (ЭТ), кроме фактической температуры, учитывает только влажность воздуха. Опытным путем установлен ряд сочетаний температуры и относительной влажности воздуха, при которых эффект теплоотдачи и теплоощущения будет одинаковым. Их принято выражать в градусах температуры насыщенного водяными

парами неподвижного воздуха – в градусах эффективной температуры [54]. ЭТ – это значение температуры, которое должен иметь сухой воздух при штиле, чтобы оказывать на человеческий организм такое же воздействие, как и неподвижный воздух, обладающий данной влажностью.

Эффективная температура:

$$Et = t - 0,4(t-10) \times (1-f/100),$$

где f – относительная влажность воздуха; t – температура воздуха в °С.

Эффективная температура является одной из характеристик ощущения степени тепла или холода организмом человека. Интервал значений эффективной температуры, при которых большинство людей чувствуют себя наиболее комфортно, называют зоной комфорта. Комфортные условия для человека могут складываться в теплое полугодие при определенных сочетаниях температуры, влажности воздуха и скорости ветра. Одним из биометеорологических индексов, характеризующим эффект воздействия на человека комплекса метеорологических величин (температура, влажность воздуха и ветер), является эквивалентно-эффективная температура. ЭЭТ – показатель, характеризующий комплексное воздействие на человека температуры, влажности и скорости движения окружающего воздуха для теневых пространств. В жаркую погоду ЭЭТ влажного воздуха будет выше фактической температуры, а при ветре ЭЭТ может быть ниже фактической; в холодную погоду при ветре и высокой влажности ЭЭТ всегда ниже фактической температуры.

В подвижном воздухе (при $V > 0,2$ м/с) интенсивность теплоотдачи усиливается, величина теплоощущения изменяется. В отечественной практике расчетов для совместной оценки воздействия T , f , V используется формула, предложенная Б.А. Айзенштатом [54]:

$$\begin{aligned} \text{ЭЭТ} = & t [1 - 0,003(100 - f)] - 0,385v^{0,59} [(36,6 - t) + 0,622(v - 1)] + \\ & + [(0,0015v + 0,008)(36,6 - t) - 0,0167](100 - f), \end{aligned}$$

где t , v , f – температура, скорость, относительная влажность воздуха.

Зона комфорта – это совокупность метеорологических условий, в которых человек получает субъективно хорошее теплоощущение, удерживает нормальный теплообмен, сохраняет нормальную температуру тела и не выделяет пота [54].

Недостаток индексов ЭТ и ЭЭТ состоит в недоучете теплоощущения от нагревания солнечной радиацией. Он преодолевается применением радиационно-эквивалентно-эффективной температуры (РЭЭТ) [54]. РЭЭТ – показатель теплового ощущения человека под влиянием комплексного воздействия температуры и влажности возду-

ха, скорости ветра, энергетической освещенности солнечной радиацией (интенсивности) [58] и является самым комплексным показателем комфортности погоды теплого полугодия.

При отсутствии данных о солнечной радиации приближенные оценки РЭЭТ для теплоощущений на солнце получают по приближенным соотношениям И.В. Бутьевой [19, 54]:

$$РЭЭТ \approx 0,83 \text{ ЭЭТ} + 12^\circ\text{C},$$

где $\text{ЭЭТ} = t [1 - 0,003(100 - f)] - 0,385v^{0,59} [(36,6 - t) + 0,622(v - 1)] + [(0,0015v + 0,008)(36,6 - t) - 0,0167](100 - f)$ (по Б.А. Айзенштату),
где t, v, f – температура, скорость, относительная влажность воздуха.

6.2. Изменения показателей суровости и комфортности погоды зимнего периода

Изменения суровости погоды по индексу Бодмана за последнее тридцатилетие.

Лимитирующим условием для ощущения комфортности погоды для зимних видов отдыха является суровая и пасмурная погода.

Суровость погоды холодного периода на каждый день оценивалась индексом Бодмана. За 1976 – 2005 гг. на каждый день вычислялись значения индекса Бодмана и подсчитывалось число дней в году с суровой погодой ($B > 3$). В это число входили дни и с более жесткими погодными условиями (суровая, очень суровая, жестко суровая и крайне суровая погода), если они были. По этим ежегодным данным вычислялись многолетние тренды числа дней в году с суровой погодой.

Здесь и далее расчеты выполнены по данным наблюдений 1612 станций России. Основное внимание уделено южным районам Сибири, в сравнении с другими регионами России.

На рис. 6.1 показано распределение в России положительных и отрицательных трендов количества дней в году с суровой погодой. Выделены станции со статистической достоверностью трендов более 95%.

Из рис. 6.1 видно, что на территории России изменения климата последних трех десятилетий сопровождались преимущественно уменьшением числа дней с суровой и очень суровой погодой. Следовательно, увеличивалось число дней с температурно-ветровыми условиями, благоприятными для зимнего отдыха и занятий зимними видами спорта.

Наиболее существенное уменьшение числа дней с суровой погодой произошло на ЕТР, за исключением Кольского полуострова, и на всей южной половине Сибири и Дальнего Востока. На ЕТР количество суровых дней сократилось на 30 – 60 дней, на юге Сибири и Дальнего Востока – на 30 – 40 дней, на Камчатке и Чукотке – на 30 – 60 дней.

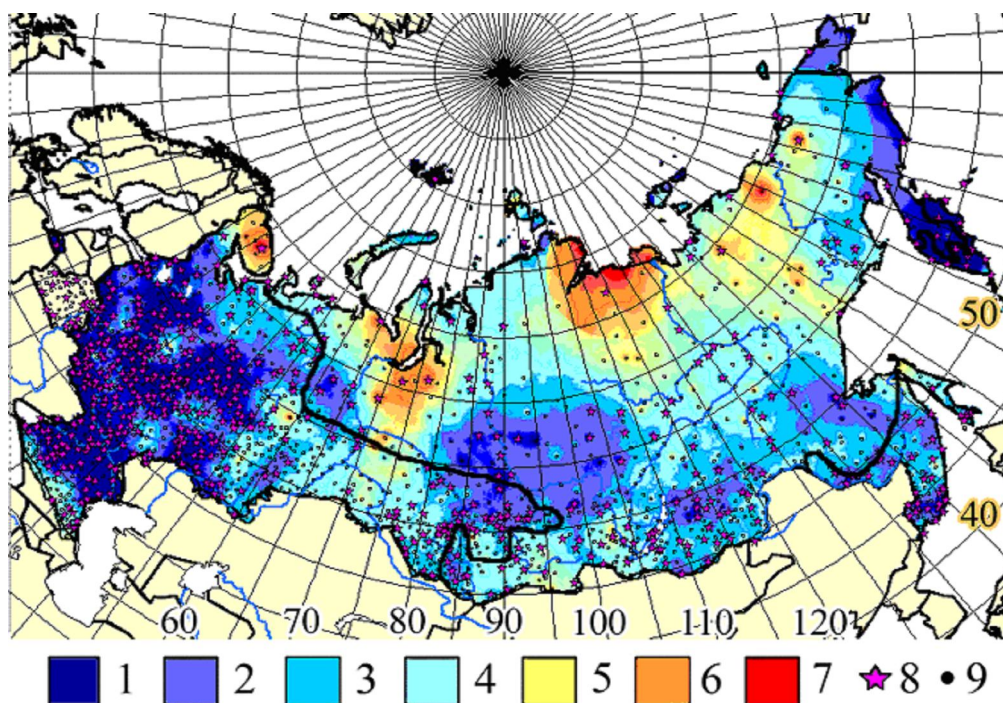


Рис. 6.1. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда количества дней (n) в году с суровой погодой ($B > 3$) за период 1976 – 2005 гг.: 1 – $n \leq -60$; 2 – $-60 < n \leq -40$; 3 – $-40 < n \leq -30$; 4 – $-30 < n \leq -20$; 5 – $-20 < n \leq 0$; 6 – $0 < n \leq 20$; 7 – $20 < n \leq 60$; 8 – достоверность $\geq 95\%$; 9 – незначимый тренд

Из перечисленных районов южная половина Сибири входит в район исследования. На территории криолитозоны и вблизи ее южных границ указанная половина Сибири с относительно большой плотностью населения является наиболее перспективной для развития зимнего отдыха и зимних видов спорта вблизи крупных городов и сопутствующих поселений.

Изменения климата привели к тому, что в холодную часть года в последние 30 лет, по сравнению с более ранними годами, уменьшилось число дней со всеми категориями суровой погоды. Сезонный интервал с погодой, благоприятной для зимнего отдыха и зимних видов спорта, увеличился на обширных территориях на 30 – 60 дней.

Изменения приведенной температуры за 1966 – 2005 гг.

За 1966 – 2005 гг. на каждый день холодного полугодия вычислялись значения приведенной температуры (по Хайруллину–Адаменко). Зимние дни со средней суточной температурой воздуха в диапазоне от -5°C до -15°C биоклиматологи относят к наиболее оптимальным для прогулок и зимних видов спорта [58]. На каждый год подсчитывалось число дней за холодное полугодие со среднесуточной приведенной температурой воздуха в интервале $-15 \leq t_{\text{прив}} \leq -5^{\circ}\text{C}$. По этим ежегод-

ным данным строились уравнения линейного тренда. А по уравнениям вычислялись трендовые значения числа дней в году с температурой $-15 \leq t_{\text{прив}} \leq -5$ (N) в 1966 и 2005 гг. Относительное изменение полученных значений вычислялось следующим образом:

$$\Delta N = 100(N_{2005} - N_{1966})/N_{1966} \quad (\%).$$

На рис. 6.2. показано ΔN – изменение (в %) трендовых значений числа дней с $-15 \leq t_{\text{прив}} \leq -5$ на территории России в 2005 г. по отношению трендовому значению таких же дней в 1966 году.

На карте видно, что за период 1966 – 2005 гг. число дней с приведенной температурой $-5 \div -15$ °С возросло на всей территории России, исключая Чукотку. Статистически значимыми являются значения на карте 20% и более.

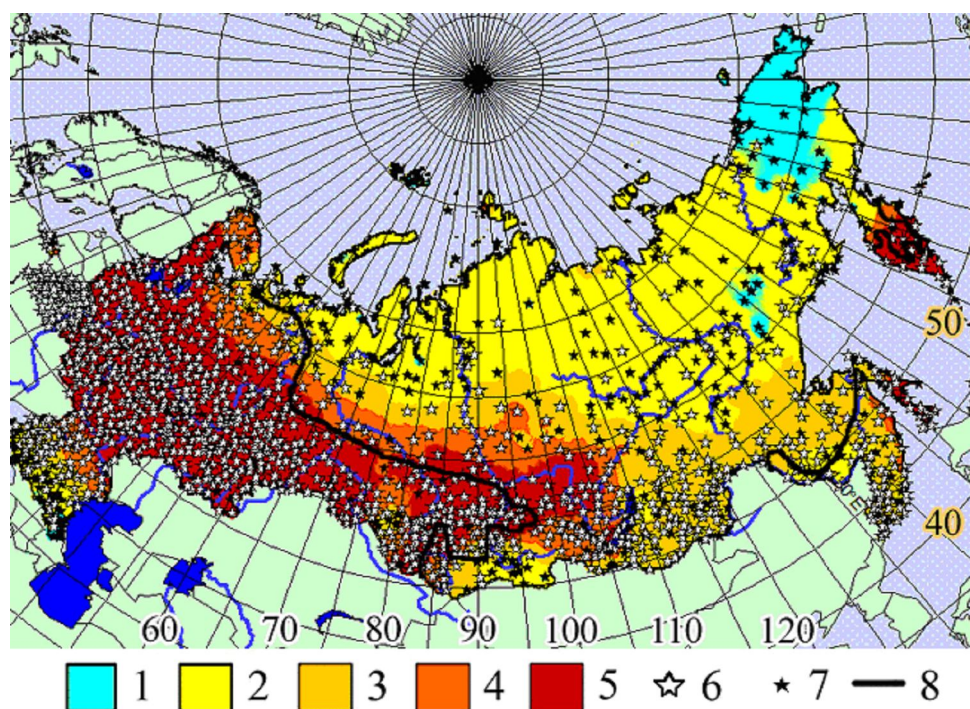


Рис. 6.2. Относительное изменение числа дней холодного полугодия со средне-суточной приведенной температурой воздуха $-15 \leq t_{\text{прив}} \leq -5$ (ΔN) за 1966 – 2005 гг., выраженное в %: 1 – $-20 < \Delta N < 0$; 2 – $0 < \Delta N < 20$; 3 – $20 \leq \Delta N < 40$; 4 – $40 \leq \Delta N < 60$; 5 – $60 \leq \Delta N < 80$; 6 – достоверность 95%; 7 – незначимый тренд; 8 – южная граница многолетней мерзлоты

На территории криолитозоны в северных районах Сибири увеличение числа благоприятных дней составляет менее 20% и статистически недостоверно, а в южных увеличилось от 20 до 80%, при этом на юге Восточной Сибири – 20 – 40%, а на юге Западной Сибири – более 40%. Увеличение числа благоприятных дней более чем на 20% статистически достоверно. Таким образом, за последние

четыре десятилетия климатические условия холодного полугодия стали более комфортными для прогулок и занятий зимними видами спорта на юге Сибири.

Глобальное потепление [128] сопровождается ростом экстремальности климата в средних и высоких широтах, поэтому важно изучить изменение числа дней с экстремально низкими значениями приведенной температуры. По данным [58], средняя суточная температура воздуха зимой $t_{\text{прив}} \leq -25^\circ\text{C}$ лимитирует пребывание человека на открытом воздухе из-за возможности значительного переохлаждения организма человека. Относительное изменение числа дней холодного полугодия со среднесуточной приведенной температурой воздуха $t_{\text{прив}} \leq -25^\circ\text{C}$ исследовалось за тот же период. Оказалось, что в криолитозоне уменьшение числа холодных дней с лимитирующей температурой составило 0 – 20% в северной половине и 20 – 40% – в южных районах криолитозоны, местами число суровых дней сократилось на 60% и более. Однако статистическая достоверность этих оценок по преобладающему числу станций ниже 95%. Поэтому нельзя сделать надежных выводов об изменении числа дней с экстремально низкими значениями приведенной температуры, можно говорить только о тенденции уменьшения числа дней с некомфортно низкой приведенной температурой.

Таким образом, за исследуемый интервал лет – с 1966 по 2005 год – на территории криолитозоны в зимний период преобладает заметное увеличение числа благоприятных для человека дней на фоне тенденции к сокращению количества дней с экстремально низкими температурами, которые потенциально опасны для здоровья человека.

Изменение числа солнечных дней

Для получения количественных оценок использовались данные о количестве общей облачности, выраженной в баллах, полученные на метеорологических станциях. Солнечными считались такие дни, когда среднесуточное количество общей облачности было не более 3 баллов.

Для каждого года в интервале 1966 – 2005 гг. было посчитано количество солнечных дней за холодный (октябрь–март) период года. Полученные временные ряды позволили получить уравнения линейных трендов числа солнечных дней по полугодиям и за год в целом. По этим уравнениям были вычислены значения числа солнечных дней в 1966 и 2005 гг. и вычислены относительные изменения числа солнечных дней в холодное полугодие (в %) за четыре десятилетия (G) :

$$\Delta G = 100(G_{2005} - G_{1966})/G_{1966} \quad (\%).$$

Построены карты изменения числа солнечных дней за холодный период.

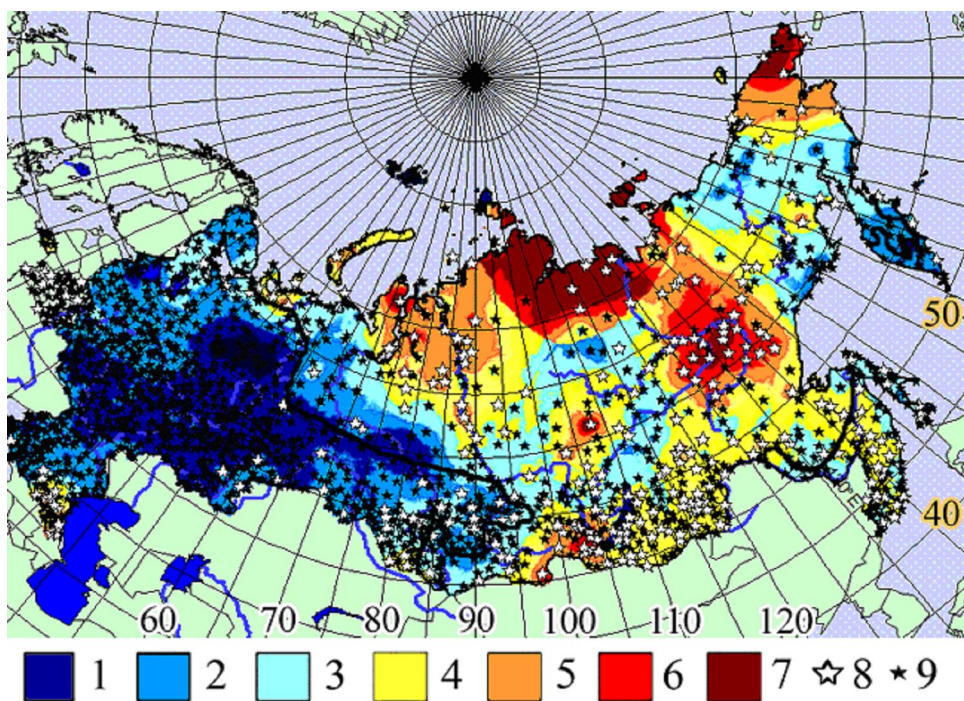


Рис. 6.3. Относительное изменение числа солнечных дней (общая облачность 0–3 балла) холодного полугодия за 1966 – 2005 гг., выраженное в %:
 1 – $-30 \leq \Delta G < -20$; 2 – $-20 \leq \Delta G < -10$; 3 – $-10 \leq \Delta G < 0$; 4 – $0 \leq \Delta G < 10$;
 5 – $10 \leq \Delta G < 20$; 6 – $20 \leq \Delta G < 30$; 7 – $30 \leq \Delta G < 40$;
 8 – достоверность $\geq 95\%$; 9 – незначимый тренд

На рис. 6.3 показано изменение (в %) трендовых значений числа солнечных дней на территории России за холодный период в 2005 г. по отношению к трендовому значению таких же дней в 1966 году.

Из рис. 6.3 видно, что за последние четыре десятилетия в южной половине Западной Сибири количество солнечных дней в холодный период года уменьшилось на 10 – 20% , оценки статистически достоверны.

А в Восточной Сибири и на Чукотке преобладает увеличение числа солнечных дней. Статистически значимые тренды наблюдаются в районах вблизи среднего и нижнего течения Енисея, на всем Сибирском Севере, в Саянах, в Забайкалье и на горных территориях вблизи р. Алдан и восточнее р. Лена, а также на Чукотке. Это увеличение составляет преимущественно 10 – 20%.

6.3. Изменения показателей комфортности погоды летнего периода

Как было описано выше, существуют различные индексы для определения комфортности теплого периода года. Каждый из них позволяет оценить комфортные условия при наличии определенной совокупности метеозлементов, однако наиболее полный учет всех метеорологических

элементов, определяющих комфортную погоду теплого периода года, дает радиационно-эквивалентно-эффективная температура (РЭЭТ).

За 1966 – 2005 гг. на каждый день теплого полугодия вычислялись значения РЭЭТ. Комфортная РЭЭТ лежит в пределах от 20 до 24 °С. На каждый год подсчитывалось число дней (N) за полугодие с комфортной среднесуточной РЭЭТ: $20 \leq \text{РЭЭТ} \leq 24$ °С. Полученные ежегодные данные числа дней с температурой в заданной градации представляют собой временной ряд. По данным временного ряда вычислялись уравнения линейных трендов для каждой станции. А по полученным уравнениям вычислялись трендовые значения числа дней в году с $20 \leq \text{РЭЭТ} \leq 24$ °С в 1966 и 2005 гг.

По формуле $\Delta N = 100(N_{2005} - N_{1966})/N_{1966}$ (%) вычислено относительное изменение за сорок лет числа дней с РЭЭТ в заданной градации.

На рис. 6.4 показано относительное изменение (в %) трендовых значений числа дней с $20 \leq \text{РЭЭТ} \leq 24$ на территории России в 2005 г. по отношению к трендовому значению таких же дней в 1966 году.

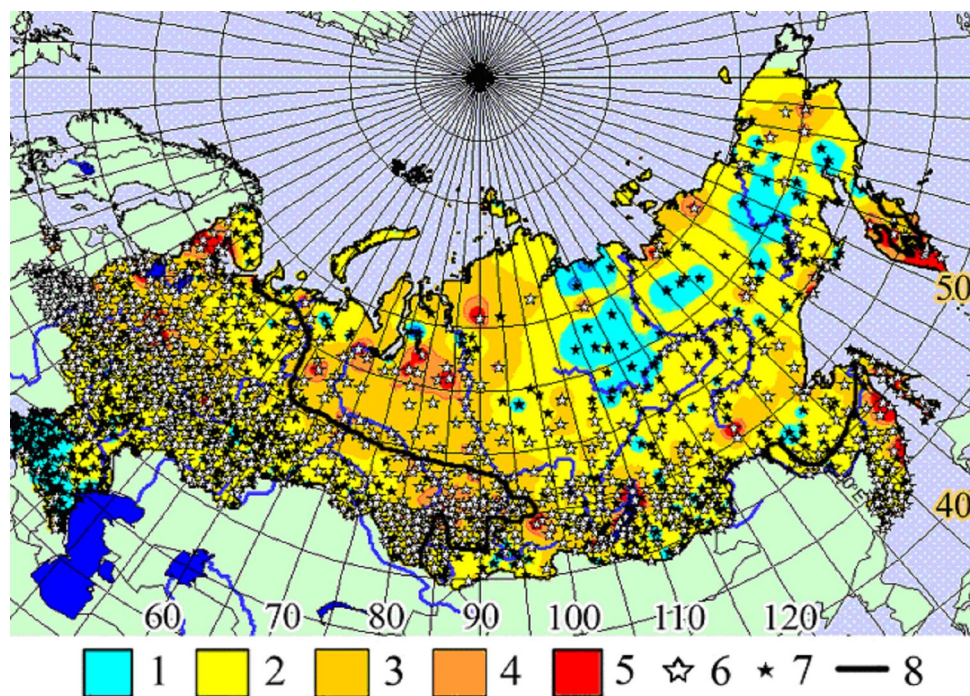


Рис. 6.4. Относительное изменение числа дней теплого полугодия с комфортной радиационно-эквивалентно-эффективной температурой (20 – 24°С) за 1966 – 2005 гг., выраженное в %: 1 – $-20 < \Delta N < 0$; 2 – $0 < \Delta N < 20$; 3 – $20 \leq \Delta N < 40$; 4 – $40 \leq \Delta N < 60$; 5 – $60 \leq \Delta N < 80$; 6 – достоверность $\geq 95\%$; 7 – незначимый тренд; 8 – южная граница многолетней мерзлоты

20 – 24°С – это диапазон температур, при которых теплоощущение одетого человека в условиях умеренных широт соответствует оптимальному. Из карты следует, что за период 1966 – 2005 гг. число дней с оптимальным для человека диапазоном температур возросло на

большей части территории России. С учетом статистической достоверности оценок получилось, что на ЕТР число оптимальных дней возросло на 20 – 40% в центральных и западных областях. На юге и на северо-востоке ЕТР число оптимальных дней увеличилось не более чем на 20%, а на Кавказе значимых изменений почти не обнаруживается. В Сибири число оптимальных дней возросло на 20 – 40%, за исключением небольших территорий Восточной Сибири и Дальнего Востока, где изменение числа оптимальных дней ниже критерия статистической достоверности.

Таким образом, изменения климата создают на рассматриваемой территории благоприятные предпосылки для развития лечебного и оздоровительного отдыха, спортивного туризма и способствуют повышению природной комфортности проживания населения.

Выводы

1. В холодную половину года в населенных регионах вблизи южной границы криолитозоны изменения климата последних трех десятилетий сопровождались преимущественно уменьшением на 30 – 40 дней с суровой и очень суровой погодой. Изменения климата привели к увеличению сезонного интервала с погодой, благоприятной для зимнего отдыха и зимних видов спорта.

2. За последние четыре десятилетия вблизи южной границы криолитозоны количество солнечных дней в холодный период года уменьшилось в Западной Сибири и увеличилось в Восточной Сибири. Это увеличение составляет преимущественно 10 – 20%.

3. За период 1966 – 2005 гг. число дней с оптимальным (по РЭ-ЭТ) для человека диапазоном температур возросло на большей части территории России. В Сибири число оптимальных дней возросло на 20 – 40%, за исключением небольших территорий Восточной Сибири и Дальнего Востока, где изменение числа оптимальных дней ниже критерия статистической достоверности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии описаны авторские исследования, которые позволили ответить на некоторые вопросы, связанные с изменением климата и их последствиями в зоне многолетней мерзлоты России. Получены следующие основные 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 Предбайкалье – Забайкалье на глубине 320 см к смещению на 500 ± 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, 1976 гг.) без учета современных и будущих изменений климата.

5. За последние три десятилетия (1971 – 2005 гг.) в теплую часть года потенциальная горимость лесов на территории России преимущественно повысилась. В местах, занятых тайгой и хвойными лесами, повышение горимости произошло почти повсеместно. Наибольшее обострение ситуации сложилось в южной половине Сибири (увеличилось на 10 – 40% число дней с высокой горимостью). В этих районах складываются все необходимые условия для лесных пожаров (сухая жаркая погода, наличие лесов и наличие антропогенных источников возгорания), которые в свою очередь окажут негативное влияние на термическое состояние почвогрунтов зоны мерзлоты и могут усилить их современную деградацию.

6. За интервал лет с 1966 по 2005 г. на территории России в зимний период наблюдается заметное увеличение числа благоприятных для человека дней на фоне тенденции к сокращению количества дней с экстремально низкими температурами, которые потенциально опас-

ны для здоровья человека. Число дней с оптимальными, комфортными для человека условиями возросло на преобладающей части территории России. При этом самый значительный рост оптимальных дней наблюдается в Западной Сибири, а также в южной части Восточной Сибири и Дальнего Востока. Изменения климата создают на рассматриваемой территории благоприятные предпосылки для развития лечебного и оздоровительного отдыха, спортивного туризма и способствуют повышению природной комфортности проживания населения.

Автор выражает свою признательность и благодарность канд. физ.-мат. наук Разуваеву В.Н. (зав. отделом климатологии ГУ «ВНИИГМИ-МЦД») за поддержку и содействие в проведении работы, а также д-ру геогр. наук Анохину Ю.А. (зам. директора ГУ «ИГКЭ») за полезное обсуждение и консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абатурова И., Савинцев И., Петрова И. Многолетнемерзлые породы как фактор экологических условий севера Западной Сибири // Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Г.В. Богомоллова «Проблемы водных ресурсов, геотермии и геоэкологии». Т. 2. – Минск, 2005. – С. 4–5.
2. Абаимов А.П., Прокушкин С.Г., Зырянова О.А. Эколого-фитоценотическая оценка воздействия пожаров на леса криолитозоны Средней Сибири // Сибирский экологический журнал. – 1996. – Т. 3, № 1. – С. 51–60.
3. Адаменко В. Н., Хайруллин К. Ш. Оценка условий пребывания человека на открытом воздухе зимой с учетом микроклимата застройки // Труды ГГО. – 1969. – Вып. 248. – С. 74–81.
4. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Моделирование воздействия антропогенного потепления на вечную мерзлоту: учет влияния растительности // Метеорология и гидрология. – 2004. – №11. – С. 73–82.
5. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология. – 2006. – №6. – С. 15–22.
6. Анисимов О.А., Величко А.А., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Мохов И.И., Нечаев В.П. Влияние изменений климата на вечную мерзлоту в прошлом, настоящем и будущем // Глобальные изменения климата и их последствия для России / Под ред. Г.Н. Голицына, Ю.А. Израэль). – М.: Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002. – С. 287–309.
7. Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. – 1997. – №5. – С. 71–80.
8. Анохин Ю.А., Величко А.А., Демченко П.Ф. и др. Россия в условиях глобальных изменений окружающей среды и климата / Отв. ред. С.А. Пегов. – М.: ИСА РАН, 1993. – 49 с.
9. Анохин Ю.А., Израэль Ю.А. Системный анализ и имитационное математическое моделирование как методологическая основа определения допустимых нагрузок антропогенных загрязнений окружающей среды: региональный подход // Всесторонний анализ окружающей природной среды. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – С. 68–82.
10. Архипова И.В. Показатели медико-географической оценки комфортности климата // Шестое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу, Томск, 14–16 сентября 2005 г., – Томск: Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 2005. – С. 79–83.

11. Багрова В.З., Фалейчик Л.М. Пожарная ситуация в бассейне реки Хилок // Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия. – Томск: Томский университет, 2003.
12. Бакалин В.А., Ветрова В.П. Взаимосвязь растительного покрова с глубиной залегания мерзлоты на мерзлотных почвах в долине реки Уксичан (Быстринский природный парк) // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Материалы Пятой научной конференции. – Петропавловск-Камчатский: КамчатПресс, 2004. – С. 260–264.
13. Баулин В.В. Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР. – М.: Недра, 1965. – 176 с.
14. Белин П.Н., Гребенец В.И., Керимов А.Г., Великоцкий М.А., Чигир В.Г. Зданиям в Заполярье нужны подвалы // Химия и жизнь – XXI век, 2006. http://www.informnauka.ru/rus/2006/2006-05-26-06_168_r.htm
15. Белолуцкая М.А. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту и инженерную инфраструктуру Крайнего Севера // Дис. канд. физ.-мат. наук. – М.: РГБ, 2003. – 111 с.
16. Будыко М.И., Израэль Ю.А. (ред.) Антропогенные изменения климата. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 406 с.
17. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Кузнецова В.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т. Анализ изменчивости климата на территории России в последние десятилетия // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2000. – Вып.167. – С. 3–15.
18. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в последние десятилетия // Труды ГУ ВНИИГМИ-МЦД». – 2007. – Вып. 173. – С. 54–62.
19. Бутьева И. В., Швейнова Т. Г. Методические вопросы интегрального анализа медико-климатических условий // Комплексные биоклиматические исследования. – М., 1988. – С 97–108.
20. Быховец С.С., Сорокинов В.А., Мартуганов Р.А., Мамыкин В.Г., Гиличинский Д.А. История наблюдений за температурой почвы на сети метеорологических станций // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 1. – С. 7–20.
21. Бюллетень текущих изменений климата, ВНИИГМИ-МЦД. http://meteo.ru/climate_var
22. Вартанова О.В. Методические подходы к оценке надежности и экологической безопасности промысловых трубопроводов // Нефтяное хозяйство. – 1998. – №11. – С. 47–48.
23. Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // Криосфера Земли. – 2008. – Т. XII, № 2. – С. 10–18.

24. Вахрамеева Л.А. Картография. – М.: Недра, 1981. – 223 с.
25. Величко А.А., Борисова О.К., Зеликсон Э.М., Климанов В.А., Нечаев В.П. Сценарии антропогенных изменений климата для криолитозоны Северного полушария по данным палеореконструкций и численного моделирования. Тезисы докладов. Международная конференция «Мониторинг криосферы». Пущино, 20–23 апреля 1999 г. – Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН. – С. 37–38.
26. Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Поржнякова О.М. Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. – М.: Наука, 1996. – 150 с.
27. Величко А.А., Нечаев В.П. Сценарии изменения криолитозоны России при глобальном потеплении климата // Материалы Первой конференции геокриологов России. Книга 2. М., МГУ, 1996. с. 309–318.
28. Величко А.А., Нечаев В.П. К оценке динамики зоны многолетней мерзлоты в Северной Евразии при глобальном потеплении климата // Доклады РАН. – 1992. – Т. 384. – № 3. – С. 667–671.
29. Воейков А.И. Избранные сочинения. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 259 с.
30. Гаврилова М.К. Климаты холодных регионов Земли. – Якутск: СО РАН, 1998. – 207 с.
31. Газпром и CNPC готовятся к переговорам о строительстве газопровода «Алтай» // ГУП МО «Мособлгаз» (официальный сайт). http://www.mosoblgaz.ru/news_2_51.htm
32. Гараевская Л.С., Малюсова Н.В. Практическое пособие по картографии. – М.: Недра, 1976. – 301 с.
33. Гиличинский Д.А. Сезонная криолитозона Западной Сибири. – М.: Наука, 1986. – 143 с.
34. Голубкова Е. Газпром поборется с КазМунайГазом за Китай // РБК daily, 10.11.2006. <http://www.rbcdaily.ru/print.shtml?2006/11/10/tek/249251>
35. Гребенец В.И. Негативные последствия деградации мерзлоты // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. – М.: МГУ, 2007. – № 3. – С. 18–21.
36. Гребенец В.И. Негативные последствия деградации мерзлоты // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. – М.: МГУ, 2007. – № 3. – С. 18–21.
37. Григорьева Е.А. Оценка дискомфорта климата Еврейской автономной области // Исследовано в России. – 2003. – №147. <http://zhurnal.apr.relarn.ru/articles/2003/147.pdf>
38. Гройсман П.Я., Кокнаева В.В. О влиянии процесса урбанизации на оценки глобального потепления // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 9. – С. 5–11

39. Груза Г.В. Бюллетень изменения климата. Обзор состояния и тенденций изменения климата России 2000 г. <http://climatechange.igce.ru>
40. Груза Г.В. Бюллетень изменения климата. Обзор состояния и тенденций изменения климата России 2006 г. <http://climatechange.igce.ru>
41. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояния, изменчивости и экстремальности климата // Всемирная конференция по изменению климата, Москва, 29 сентября–3 октября 2003 г. // Труды. – М.: Паблик-Принт, 2004. – С. 101–110.
42. Демченко П.Ф., Величко А.А., Голицын Г.С., Елисеев А.В., Нечаев В.П. Судьба вечной мерзлоты: взгляд из прошлого в будущее // Природа. – 2001. – №11. – С. 43.
43. Думнов А. Д., Максимов Ю. И., Рощупкина Ю. В., Аксенова О.А. Лесные пожары в Российской Федерации. Статистический справочник. – М.: НИИ «Природа», 2005. – 229 с.
44. Ершов Э. Д. Деградация мерзлоты при возможном глобальном потеплении климата // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 2. – С.70–74.
45. Желтиков В.П., Кузнецов Н.Г., Тяглов С.Г. Экономическая география. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. – 384 с.
46. Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2004 году // Всемирная метеорологическая организация, ВМО-№ 983. – Женева, 2005. – С. 11.
47. Изменение климата. Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в подготовку Третьего доклада об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата // Под ред. Р.Т.Уотсона. – ВМО, ЮНЕП, 2001. – 215 с.
48. Израэль Ю.А., Груза Г.В., Катцов В.М., Мелешко В.П. Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий // Метеорология и гидрология. – 2001. – №5. – С. 5–22.
49. Израэль Ю.А., Павлов А. В., Анохин Ю. А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорология и гидрология. – 2002. – №1. – С. 22–32.
50. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных регионах России // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 1. – С. 18–26.
51. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А., Мяч Л.Т., Шерстюков Б.Г. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – 2006. – №5. – С. 27–38.
52. Израэль Ю.А., Семенов С.М., Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Величко А.А., Ревич Б.А., Шикломанов И.А. Четвертый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению

- климата: вклад Рабочей группы II // Метеорология и гидрология. – 2007. – №9. – С. 5–10.
53. Ильичев В.А., Владимиров В.В., Садовский А.В., Замараев А.В., Гребенец В.И., Кутвицкая Н.Б. Перспективы развития поселений Севера в современных условиях. – М.: ЦИСН Минпромнауки России и РАН, 2003. – 151 с.
54. Исаев А.А. Экологическая климатология. – М.: Научный мир, 2001. – 458 с.
55. Итоги научной деятельности Росгидромета за 2006 год. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2006 г. <http://www.meteorf.ru>
56. Клименко В.В., Хрусталева Л.Н., Микушина О.В., Емельянова Л.В., Ершов Э.Д., Пармузин С.Ю., Терешин С.Ю. Изменения климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России в ближайшие 300 лет // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 3. – С. 3–13.
57. Кобышева Н.В. Климат России. – СПб.: Гидрометеиздат, 2001. – 654 с.
58. Кобышева Н.В. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – 319 с.
59. Конищев В.Н. Современные тенденции развития криолитозоны. География, общество, окружающая среда. Т. 1. Структура, динамика и эволюция природных геосистем. – М.: ИД «Городец», 2004. – С. 367–376.
60. Конищев В.Н., Лебедев - Верба М.П., Рогов В.В., Сталина Е.Е. Криогенез современных и позднелейстоценовых отложений Алтая и перигляциальных областей Европы. – М.: Геос, 2005. – 133 с.
61. Константинов П.Я., Аргунов Р.Н., Герасимов Е.Ю., Угаров И.С. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // Криосфера Земли. – 2006. – Т. X, № 3. – С. 15–22.
62. Коровин Г. Н., Исаев А.С. Охрана лесов от пожаров как важнейший элемент национальной безопасности России // Лесной бюллетень, №8–9, 1998. <http://www.forest.ru/rus/bulletin/08-09/index.html>
63. Коровин Г.Н., Зукерт Н.В. Влияние климатических изменений на лесные пожары в России. http://www.rusrec.ru/kyoto/articles/art_climate_forest.htm 14.
64. Котляков В.М., Агранат Г.А. Российский Север – край больших возможностей // Вестник Российской академии наук. – 1999. – Т. 69, № 1. – С. 3–15.
65. Кравченко И. В. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. – М.: Гидрометеиздат, 1975.

66. Кудрявцев В.А. Мерзлотоведение. – М.: МГУ, 1981 г. – 240 с.
67. Кудрявцев В.А. Температура вечномёрзлой толщи в пределах СССР. – М.: АН СССР, 1954. – 182 с.
68. Кудрявцев С.А. Численные исследования теплофизических процессов в сезонномёрзлых грунтах // Криосфера Земли. – 2003. – Т. VII, № 4. – С. 76–81.
69. Лыткина Л.П. Изменение микроклиматических условий на гарях в лиственничных лесах Лено-Амгинского междуречья // Материалы Всероссийской конференции «Природная и антропогенная динамика наземных экосистем». Иркутск, 11–15 октября 2005 г. – Иркутск: Изд-во Иркутского политехнического университета. – 2005. – С. 110–113.
70. Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Павлова Т.В. Модельные оценки изменений температуры воздуха и эволюция теплового состояния многолетнемёрзлых пород // Криосфера Земли. – 2005. – Т. IX, № 3. – С. 36–44.
71. Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Павлова Т.В., Семиошина А.А. Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемёрзлых грунтов // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 1. – С. 29–36.
72. Матвеев П.М. Влияние лесных пожаров на глубину оттаивания почвы в лиственничниках, произрастающих на мёрзлых грунтах // Лиственница и ее использование в народном хозяйстве. Межвузовский сборник научных трудов, Красноярск. – 1980. – С. 21–23.
73. Матвеев П.М. Послепожарное оттаивание почвы в лиственничниках, произрастающих в зоне распространения многолетней мёрзлоты // Лиственница, проблемы комплексной переработки. Сборник статей. – Красноярск, 1984. – С. 36–41.
74. Мельников В.П. Человек и криосфера Земли // Криосфера Земли. – 1998. – Т. II, №4. – С. 14–18.
75. Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В. Геокриологические последствия современных изменений глобального климата // География и природные ресурсы. – 2007. – № 3. – С. 19–27.
76. Назаров И.М., Израэль Ю.А., Гитарский М.Л., Нахутин А.И., Яковлев А.Ф. Проблема антропогенного воздействия на климат и Киотский протокол // Метеорология и гидрология. – 2004. – №4. – С. 137–149.
77. Нечаев В.П. О некоторых соотношениях между мёрзлотными и климатическими параметрами и их палеогеографическое значение // Вопросы палеогеографического плейстоцена ледниковых и пе-

- ригляционологических областей / Под ред. А.А. Величко, В.П. Гричука. – М., 1981. – С. 211–220.
78. Нечаев В.П. Реакция криолитозоны территории России на изменения климата в XX веке // Пути эволюционной географии (итоги и перспективы). – М.: ИГ РАН, 2002. – С. 82–92.
79. Николаев Н.Н. Основные причины возникновения аварийных отказов на магистральных трубопроводах // Нефть и газ. Известия вузов. Тюменский государственный университет. – 1999. – №2. – С. 77–81.
80. Оболенский В.Н. Основы метеорологии. – М.: Государственное изд-во колхозной и совхозной литературы, 1933. – 450 с.
81. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Пугачева Е.С. Термический режим грунтов и динамика метеорологических параметров на Антарктическом полуострове (станция Беллинсгаузен) // Материалы гляционологических исследований. – Вып. 103. – М.: Наука, 2007. – С. 155–158.
82. Павлов А.В. Закономерности формирования криолитозоны при современных изменениях климата // Известия РАН. Серия географическая. – 1997. – № 4. – С. 61–73.
83. Павлов А.В. Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения и прогноз // Известия РАН. Серия географическая. – 2003. – № 6. – С. 42–50.
84. Павлов А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли. – 1997. – Т. I, № 1. – С. 47–58.
85. Павлов А.В., Ананьева Г.В. Современные изменения климата и криолитозоны в нефтегазоносных районах севера России // Криосфера Земли. – 2005. – Т. IX, №1. – С. 89–95.
86. Павлов А.В., Ананьева Г.В., Дроздов Д.С. и др. Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на Севере России // Криосфера Земли. – 2002. – Т. VI, № 4. – С. 30–39.
87. Павлов А.В., Гравис Г.Ф. Вечная мерзлота и современный климат // Природа. – 2000. – №4. – С. 10–18.
88. Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. Альбом мелкомасштабных карт. – Новосибирск: Гео, 2005. – 54 с.
89. Павлов А.В., Москаленко Н.Г. Термический режим почвы на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. – Т. V. № 2. – 2001. – С. 11–19.
90. Павлов А.В., Скачков Ю.Б., Какунов Н.Б. Взаимосвязь между многолетними изменениями глубины сезонного протаивания грунтов и метеорологическими факторами // Криосфера Земли. – 2004. – Т. VIII, № 4. – С. 3–11.
91. Пановский Г.А., Браер Г.В. Статистические методы в метеорологии // Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 209 с.

92. Пармузин С.Ю. Районирование севера Западной Сибири по потенциальной возможности развития термокарста // Вопросы геокриологического картирования. – Якутск, 1986. – С. 78–85.
93. Перльштейн Г. З., Павлов А. В., Буйских А. А. Изменения криолитозоны в условиях современного потепления климата // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2006. – № 4. – С. 305–312.
94. Пономарев В. И., Каплуненко Д. Д., Крохин В. В. Тенденции изменений климата во второй половине XX века в Северо-Восточной Азии, на Аляске и северо-западе Тихого океана // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 2. – С. 15–26.
95. Потапова Т. В. Лесные пожары в России // В мире науки. Окружающая среда. – 2003. – №3. www.sciam.ru/2003/3/sreda1.shtml
96. Семенов С.М., Ясюкевич В.В., Гельвер Е.С. Выявление климатогенных изменений. – М.: Метеорология и гидрология, 2006. – 324 с.
97. СНиП II-18-76. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: Стройиздат, 1977. – 48 с.
98. Соколов А.А. Гидрография СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1952. – 280 с.
99. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. – М.: Росгидромет, 2005. – 28 с.
100. Строительство газопровода Алтай планируется начать в 2008 году // Официальный сайт Международного координационного совета «Наш общий дом – Алтай» 17.10.2006 г. <http://www.altaiinter.info/news/?id=14174>
101. Хандожко Л.А. Метеорологическое обеспечение народного хозяйства. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 231с.
102. Хрусталева Л. Н., Емельянова Л. В., Кауркин В. Д. Усовершенствование методики прогноза ожидаемых мерзлотно-климатических изменений на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2003. – Т. VII, № 2. – С. 23–29.
103. Хрусталева Л.Н., Давыдова И.В. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 2. – С. 68–75.
104. Хрусталева Л.Н., Клименко В.В., Емельянова Л.В., Ершов Э.Д., Пармузин С.Ю., Микушина О.В., Терешин А.Г. Динамика температурного поля многолетнемерзлых пород южных районов криолитозоны при различных сценариях климатических изменений // Криосфера Земли. – 2008. – Т. XII, № 1. – С. 3–11.
105. Цветков П.А. Исследование природы пожаров в северной тайге Средней Сибири // Хвойные бореальной зоны. – 2006. – №2. – С. 186–195.

106. Цветков П.А. Некоторые особенности природы пожаров в лесах Эвенкии // Лесные пожары и борьба с ними. Сборник статей. – Красноярск, 1991. – С. 191–204.
107. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
108. Черных В.В. Леса и лесное хозяйство Иркутской области. Иркутск, 1997. – С. VI – 186. История пожарного дела Иркутской области (1800–1990 гг.). – Иркутск, 1998.
109. Чудинова С.М., Быховец С.С., Сороковиков В.А., Барри Р., Жанг Т., Гиличинский Д.А. Особенности изменения температуры почв России в период последнего потепления климата // Криосфера Земли. – 2003. – Т. 7. – № 3. – С. 23–30.
110. Шарбатьян А.А. Большая Советская энциклопедия. – 1973. – Т. 13. – С. 429.
111. Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. – 2008. – Т. XII, №1. – С. 79–87.
112. Шерстюков А. Б. Критериальные оценки климатических условий существования многолетнемерзлых грунтов в России за период с 1976 по 2005 г. по данным наблюдений на глубине 320 см // Труды ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 2007. – Вып. 173. – С. 89–95.
113. Шерстюков А. Б. Многолетняя мерзлота России в условиях глобального потепления климата // Проблемы региональной экологии. – № 4. – 2007. – С. 8–11.
114. Шерстюков А. Б. Температура почвогрунтов России на глубинах до 320 см в условиях изменяющегося климата // Труды ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 2007. – Вып. 173. – С. 72–88.
115. Шерстюков А.Б. Температурный режим в зоне многолетней мерзлоты России в последние десятилетия // Вторая конференция молодых ученых национальных гидрометслужб государств – участников СНГ «Новые методы и технологии в гидрометеорологии», 2 – 3 октября 2006 г., г. Москва, Росгидромет. – М., 2006. – С. 23–24.
116. 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». Секция 1. Оценка состояния природной среды в России и стратегия решения основных экологических проблем; экологическая безопасность; глобальная антропогенная экология. – М., 2006. – С. 22–23.
117. Шполянская Н.А. Глобальное изменение климата и вечная мерзлота // Экология и промышленность России. – 2000. – №8. – С. 29–32.

118. Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 340 с.
119. Allard M., Wang B., Pilon J.A. Recent cooling along the southern shore of Hudson Strait Quebec, Canada, documented from permafrost temperature measurements // *Arctic and Alpine Res.* – 1995. – Vol. 27. – P. 157–166.
120. Ananjeva G.V., Melnikov E.S., Ponomareva O.E. Relict permafrost in the central part of Western Siberia // 8th Intern. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, 21–25 July 2003. – Vol. 1. – P. 5–8.
121. Brown J., Burgess M., Pavlov A. et al. The global terrestrial network for permafrost// *Rhythms of natural processes in Earth cryosphere*, Pushchino. – 2000. – P. 203–204.
122. Csiszar, I., Morisette, J. T., and Giglio, L., 2006, Validation of active fire detection from moderate resolution satellite sensors: the MODIS example in Northern Eurasia. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 44, 1757-1764, doi:10.1109/TGRS.2006.875941.
123. Current & Archived Significant Global Fire Events and Fire Season Summaries. <http://www.fire.uni-freiburg.de/current/globalfire.htm>
124. Flannigan M. D., Van Wagner C. E. Climate change and wildfire in Canada. *Can. J. For. Res.* – 1991. – 21. – P. 66–72.
125. Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y., 2003, An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87:273-282.
126. Houghton R.A. Biomass burning from the perspective of the global carbon cycle. In: *Global biomass burning: Atmospheric, climatic, and biospheric implications*. The MIT Press, Cambridge University Press, Cambridge, 1991. – 129 p.
127. IPCC 1996: Climate change. The science of climatic change / Eds. Houghton J.T. et al Cambridge. Camb. Univ. Press. 572 p. (доклад МГЭИК).
128. IPCC 1996: Climate change. The science of climatic change / Eds. Houghton J.T. et al. Cambridge: Camb. Univ. Press. – 572 p. (доклад МГЭИК).
129. IPCC 2007 http://unfccc.int/meetings/cop_13/items/4189.php
130. Justice C. O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J., Roy D., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F., Kaufman Y., 2002, The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 83:244-262.
131. Kasischke E. S., Christensen N. L., Jr., Stocks B. J. Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests // *Ecol. Appl.* – 1995. – 5. – P. 437–451.
132. Manabe S., Wetherald R. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity // *J. of the Atmospheric Sciences*. – 1967. – Vol. 24. – P. 241–259.

133. Pavlov A.V., Moskalenko N.G. The thermal regime of soils in the North and Western Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2002. – Vol. 13. – P. 43–51.
134. Razuvaev V.N., Bulygina O.N. Variation in snow characteristics over the Russia territory in recent decades. In *Proceeding of «1st Asia CliC Symposium»*, 20–22 April 2006, Yokohama, Japan. – P.35–38.
135. Romanovsky V.E., Osterkamp T.E. Permafrost: changes and impacts // *Permafrost response on economic development, environmental security and natural resources*. Dordrecht, Kluwer Acad. Publ. – 2001. – P. 297–315.
136. Torn M. S., Fried J. S. Predicting the impact of global warming on wildland fire // *Climatic Change*, 1992. – 21. – P. 257–274.
137. Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B. and Zhai P., 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA.
138. Walter K. M., Zimov S. A., Chanton J. P., Verbyla D., Chapin F. S. III. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming // *Nature*. – 2006. – Vol. 443. – P. 71–75.
139. Weller G., Lange M., eds. Impacts of global climate change in the arctic regions. Report from a Workshop on the Impacts of Global Change. . 1999, Published by Center for Global Change and Arctic System Research, University of Alaska, Fairbanks.: Tromse, Norway. – 59 p.