

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемое в последние годы изменения климатических условий по всему миру для России имеет особое значение в связи с наличием многолетнемерзлых пород. Уже отмечаемое рядом исследователей и ожидаемое в ближайшем будущем глобальное потепление наряду с положительным эффектом (снижение потребления углеводородов на отопление, улучшение агроклиматических характеристик и др.) может принести России и значительные проблемы. В первую очередь это касается состояния многолетнемерзлых пород, площадь распространения которой в России (площадь криолитозоны) превышает 11 млн. км², что составляет до 65% территории страны. В криолитозоне производится около 20% ВПП России и 22% общероссийского экспорта. В криолитозоне добывается около 90% никеля и кобальта, 60% меди, 96% платиноидов, 100% барита и апатитового концентрата. Особенно остро эта проблема стоит для северо-востока европейской части России и севера Западной Сибири, где сосредоточены богатейшие нефтегазовые месторождения, расположенные как на суше, так и на континентальном шельфе. Разработка этих месторождений, геологические запасы которых достигают 100 млрд. тонн условного топлива, будет осуществляться, по крайней мере, до конца нынешнего столетия. Там же находятся крупнейшие в мире города, построенные на многолетнемерзлых грунтах – Воркута, Норильск, Якутск, Магадан, Надым, Уренгой, Ямбург и др. с населением 100-200 тыс. жителей. Есть все основания предполагать, что уже в нынешнем столетии природно-климатическая обстановка этих регионов России изменится самым существенным образом, и это необходимо учитывать уже на этапе проектирования их быстро развивающейся инфраструктуры.

Одно из наиболее явных последствий наблюдаемого в последние десятилетия в северных регионах потепления — деградация многолетнемерзлых пород. В частности, за период систематических наблюдений (примерно с середины 50-х годов XX в.) на северо-востоке Европейской России отмечается почти повсеместное повышение температуры грунтов (*Израэль и др., 1999*). Оттаивание мерзлых пород сопровождается просадками земной поверхности и развитием опасных мерзлотных геологических процессов — термокарста, термоэрозии, солифлюкции, которые становятся причинами нарушения устойчивости инженерных сооружений на многолетнемерзлых породах. Одной из важнейших последствий деградации многолетнемерзлых пород является изменение условий работы многих сооружений в криолитозоне, которые проектировались без учета глобального потепления климата. Дело в том, что прочностные и деформационные свойства многолетнемерзлых пород, являющихся основаниями инженерных сооружений, в значительной мере зависят от температуры. С повышением температуры первые уменьшаются, а вторые возрастают, что приво-

дит к деформациям сооружений и материальному ущербу. В связи с этим инженерную общественность очень волнует вопрос глобального потепления. Ее опрос, проведенный в 1994 г. канадской фирмой "Nixon Geotech Limited" по заказу Международной ассоциации по мерзлотоведению и Канадского климатического центра, показал, что большинство респондентов считают климатическое потепление важным фактором, который следует учитывать при проектировании инженерных сооружений на Севере, если "явления пойдут за пределами предвидений существующих консервативных подходов". Иными словами, если в результате потепления будут выбраны все запасы, которые закладываются в расчет оснований и фундаментов. Оценим эти запасы применительно к зданиям, построенным по принципу I, т.е. когда грунты основания находятся в мерзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации.

При строительстве с использованием грунтов по I принципу расчет оснований в подавляющем большинстве случаев ведется по первому предельному состоянию (по несущей способности). Исходя из которого, несущая способность основания (F) должна быть равна

$$F = kN,$$

где N – нормативная нагрузка на основание; k – коэффициент запаса.

Согласно нормативным документам (СНиП 2.02.01-83, СНиП 2.01.07-85, СНиП 2.02.04-88) в зависимости от класса и назначения сооружений, условий работы основания коэффициент запаса изменяется от 1,05 до 1,56. Это означает, что если в результате повышения температуры многолетнемерзлого грунта несущая способность основания уменьшится на 5-46% первоначальной (проектной), то основание уменьшит прочность и надфундаментная конструкция разрушится. Расчеты, проведенные нами при среднегодовой температуре пород в 1980 г. и прогнозируемой к 2030 и 2060 гг. в соответствии с принятыми сценариями (см. гл. 3 и 4), по рекомендациям и указаниям СНиП 2.02.04-88 применительно к условиям районов городов Воркута и Надым показаны в табл.1.1.

Таблица 1.1

Снижение несущей способности многолетнемерзлого основания столбчатого фундамента сооружений, построенных по принципу I в районе городов Воркута и Надым

Район		Годы		
		1980	2030	2060
Воркута	Температура грунта на глубине нулевых годовых амплитуд, °C	-1,26	-0,52	-0,17
	Снижение несущей способности, %	0	33	56
Надым	Температура грунта на глубине нулевых годовых амплитуд, °C	-1,64	-0,51	-0,17
	Снижение несущей способности, %	0	40	61

Из таблицы следует, что даже при коэффициенте запаса 1,56 к 2060 году не остается надежды на сохранение существующей инфраструктуры в Воркуте и Надыме в условиях глобального потепления климата. Первые свидетельства такого положения дел уже наблюдаются на практике. По данным Я.А. Кроника (2001) число аварийных зданий в крупнейших поселках и городах Севера в 1992 г. составляло от 22% в поселке Тикси до 80% в Воркуте, в том числе в городах: Магадан – 55%, Чита – 60%, Дудинка – 35%, Норильск – 10%, Певек – 50%; в поселках: Амдерма – 50%, Диксон – 35%. За последнее десятилетие аварийность зданий возросла: в городах: Норильске до 42% , в Якутске до 61%, в поселке Амдерма до 90%. Не лучше дело обстоит и на транспорте. Если в начале 90-х годов было деформировано по причине оттаивания 10-16% протяженности земляного полотна, проходящего в криолитозоне Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, то к 1998 г. эта цифра возросла до 46%. В настоящее время более половины взлетнопосадочных полос в городах Воркута, Норильск и Магадан находятся в аварийном состоянии. Однако сразу оговоримся, что причиной деформаций является не только глобальное потепление, но и ряд других факторов, и в первую очередь некачественное строительство и плохая эксплуатация. К сожалению, выделить эти причины в массовых примерах деформаций очень трудно. Проведенный Я.А. Кроником анализ причин деформаций по промышленно-гражданским комплексам показал, что в среднем 22% деформаций происходит по вине проектировщиков, 33% – по вине строителей и 45% – по вине эксплуатационников. Поскольку ни в одном проекте не учтено глобальное потепление, которое по нашим данным началось на Севере в 1960-1980 гг. можно полагать, что в 22% случаев деформаций, происшедших по вине проектировщиков, большую часть составляет не учет изменения климата.

Для проектирования инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах в условиях глобального изменения климата в первую очередь надо определиться со сценарием его изменения.

В последние десятилетия в ряде стран развернулось обсуждение возможных сценариев и количественных оценок глобальных и региональных климатических изменений в XXI веке. Предстоящие изменения глобального климата оцениваются не однозначно: разрабатываются сценарии значительного потепления (*Будыко и др., 1992; Nelson et al., 1993*), умеренного потепления (*Борисенков, 1990; Pavlov, 1992*) и даже похолодания (*Шполянская, 1981*).

При прогнозировании возможных изменений климата используют три основных подхода:

- 1) использование моделей общей циркуляции атмосферы при увеличении в ней содержания CO₂ и других парниковых газов;
- 2) рассмотрение палеоклиматических аналогов;

3) эмпирический анализ современных вариаций метеорологических характеристик (анализ циклов и трендов).

В основе моделей общей циркуляции лежит цикл обмена CO_2 между системой (резервуарами) атмосфера – океан – биосфера. В существующих моделях углеродного цикла атмосферу обычно подразделяют на два резервуара, два блока с различными свойствами — тропосферу и стратосферу. Для атмосферы характерно хранение углерода в виде различных соединений, главным из которых является CO_2 .

Земная биосфера поглощает CO_2 в процессе синтеза и хранит углерод в своих долгосохраняющихся компонентах (стволы деревьев, соли почвы, перегной и др.). В современных моделях биосферу подразделяют на два резервуара: короткоживущую биоту с характерным временем перемешивания около 2,5 лет (листья, трава и др.) и долгоживущую биоту с временем перемешивания порядка 60 лет.

Роль океана в цикле CO_2 , по мнению большинства исследователей, исключительно велика, поскольку он является основным источником и хранителем излишков CO_2 .

Существует несколько типов моделей общей циркуляции атмосферы:

1. *Равновесные модели* воссоздают ситуацию, когда геосистема и все ее компоненты достигают квазиравновесного состояния с существующим гидротермическим режимом. Такая модель позволяет оценить максимальные масштабы возможных изменений, т. е. определить как бы окончательный итог, к которому стремится геосистема и все ее компоненты в процессе трансформации.

2. *Неравновесные (транзитивные) модели* предназначены для оценки состояния геосистем с учетом реального времени изменения гидротермического режима - десятков лет, т. е. в диапазоне, соответствующем понятию "климат" как таковому. Особо важным для ее разработки является выяснение инерционного механизма различных компонентов геосистем и динамики взаимодействия между ними.

В зависимости от основных климатообразующих факторов, таких как концентрация парниковых газов в атмосфере (углекислый газ, метан, закись азота, озон, фреоны и др.), концентрация тропосферных аэрозолей (сернокислотные или сульфатные аэрозоли), вулканическая и солнечная активности и т.д., цикл циркуляции CO_2 в системе атмосфера – океан – биосфера изменяется, что может привести к перестройке глобального и регионального климата.

Разброс прогнозных значений содержания эквивалента CO_2 в атмосфере в XXI веке чрезвычайно широк, но большинство исследователей работающих с моделями общей циркуляции предполагают удвоение концентрации углекислого газа к концу XXI века. На основании этого строятся прогнозы изменения средней глобальной температуры воздуха (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Глобальные модели климата и их краткая характеристика
(Израэль и др., 2002)

Модель	Тип модели	Изменение средней глобальной температуры воздуха при удвоении содержания CO ₂ в атмосфере, °C	ЦРД
CCC	Р	3,5	-
CGCM1.	ТДО	3,6	+
CCSR-98	ТДО	3,5	+
CSIRO	Р	4,3	-
CSIRO-Mk2	ТДО	3,7	+
ECHAM-1	ТСО	2,6	-
ECHAM-3	ТДО	2,2	+
ECHAM-4	ТДО	2,6	+
GFDLTR	ТСО	4,0	-
GFDL-R15	ТДО	4,2	+
GISS	Р	4,2	-
GISSTR	ТСО	4,2	-
NCAR	Р	4,0	-
OSU	Р	2,8	-
UKMO	Р	5,2	-
UKHI	Р	3,5	-
UKTR	ТСО	2,7	-
HadCM2	ТДО	2,5	+
HadCM3	ТДО	3,0	+

Примечание. В столбце 2 указан тип модели: Р — равновесная модель, ТДО — транзитивная модель с учетом динамики океана, ТСО — транзитивная модель без учета динамики океана (статичный океан). В столбце 4 — указана доступность результатов модельных расчетов через Центр распространения данных МГЭИК (плюс означает наличие таких данных в Интернете (<http://ipps-ddc.uca.ac.uk>)).

К сожалению, имеются значительные различия в результатах расчетов моделей. Это указывает на необходимость их совершенствования и верификации расчетных данных по материалам фактических наблюдений (Израэль и др., 2002).

Палеоклиматические аналоги используются на том основании, что для различных уровней ожидаемого повышения температуры воздуха можно найти близкие аналоги климата в прошлом. Обычно используют данные о климатических условиях трех теплых эпох прошлого: климатическом оптимуме плейстоцена (3-4 млн. лет т. н.), последнего (микулинского) межледниковья (125 тыс. лет т. н.) и голоцена (5-6 тыс. лет т. н.). Они со-

ответствуют среднему глобальному потеплению на 3-4, 2 и 1 °С соответственно (Антропогенные..., 1987; Будыко, 1991, 1992; Величко, Нечаев, 1992; Nelson et al, 1993).

Повышение температуры воздуха в высоких широтах при наиболее сильном потеплении (оптимум плиоцена) оценивается в 11-13 °С. Расчеты по радиационно-циркуляционным моделям при возможном удвоении содержания CO₂ в атмосфере дают поширотное распределение температуры воздуха, близкое к сценарию микулинского межледникового (повышение глобально-осредненной температуры воздуха на 2 °С, а на 70-80 ° с.ш. на 6-7 °С). Нередко в прогнозах используют климатический сценарий оптимума голоцена (глобально-осредненная температура воздуха возросла примерно на 1 °С, а в высоких широтах на 4,4-5,2 °С).

Прогнозируемые изменения климата, полученные при помощи палеореконокструкций, указывают на то, что наибольшее повышение температур воздуха следует ожидать в высоких широтах, не столь существенное повышение – в средних широтах, и наименьшее – в низких, анализ же метеоданных показывает, что повышение среднегодовой температуры воздуха за последние 25-30 лет не связано с географической широтой местности. Не отмечается также широтной зональности в формировании повышений температуры воздуха летом и зимой (Павлов, 1997).

На основе анализа современных трендов повышения температуры воздуха и их экстраполяции на первую половину XXI в. развит сценарий умеренного потепления климата (Анисимов, Нельсон,; Израэль и др., 1999; Pavlov, 1992; и др.). Он предполагает, что наибольшее потепление ожидается в Центральной Якутии, Западной и Восточной Сибири. Так, в Якутии прогнозируемое повышение среднегодовой температуры воздуха к 2020 г. равно 1,4-1,6 °С, а к 2050 г. — 2,5-2,8 °С. Наименьшее потепление ожидается на севере Европейской России и на северо-востоке страны.

Анализ циклов (ритмов) колебания температуры воздуха по данным многолетних наблюдений на метеостанциях, относится к следующей группе методов прогнозирования возможных изменений климата. На сегодняшний день в различных естественноисторических науках накоплен огромный фактический материал о существовании большого числа природных ритмов или колебаний различного генезиса. Периоды, фазы и интенсивность этих ритмов далеко не всегда коррелируют между собой, что обусловлено сложными причинно-следственными связями между ними. Тем не менее, можно сказать, что в основе цикличности (и особенно климатической) лежат процессы космо-астрономической (внешние), геологической (внутренние) и биогеохимической (поверхностно-земные) природы (Ершов и др., 1996).

Существование в природе ряда разнопериодных температурных колебаний (ритмов) различного происхождения, накладывающихся друг на друга и характеризующихся определенными периодами (τ), амплитудами

(А) и сдвигами фаз (φ), обуславливают ход температуры воздуха в том или ином регионе. Нахождение параметров (А и φ) таких элементарных колебаний можно осуществить на основе методов гармонического анализа. Последующее суммирование найденных гармоник (с установленными значениями τ, А и φ) позволяет построить с известной погрешностью непрерывную количественную кривую изменения температуры воздуха на исследуемом интервале времени, а также, в соответствии с возможностями метода гармонического анализа, произвести прогноз на 1/3 этого интервала (Ершов и др., 1994, 1996; Хрусталеv и др., 2000, 2002, 2003; Шендер и др., 1999).

На основе гармонического анализа данных многолетних наблюдений за температурой воздуха на метеостанциях разработана методика авторетроспективного анализа (см. глава 3), позволяющая выявлять временной интервал начала устойчивого изменения (повышения) температуры воздуха и определять скорость (тренд) этого повышения (Хрусталеv и др., 2000, 2002, 2003; Кауркин, 2005).

Данная методика на сегодняшний день, по нашему мнению, является наиболее достоверной для региональных прогнозов (на ближайшие 30-50 лет), поскольку она не зависит от априорных допущений о численных значениях природных и антропогенных факторов, а базируется только на данных инструментальных наблюдений.

Общеизвестно, что отклик геокриологической системы на климатические изменения зависит от ландшафтов, а также от состава и свойств пород и их начальной температуры. Это значительно усложняет задачу прогноза температурного режима пород и переводит ее в разряд задач, решаемых с помощью математического моделирования. Математической моделью эволюции криолитозоны обычно является задача Стефана. Эта задача относится к классу нелинейных задач и не имеет не только точных, но и приближенных аналитических решений, за исключением простейших случаев. Поэтому авторами для решения задачи Стефана использовался численный метод конечных разностей, основными особенностями которого являются:

- явная схема с регуляризацией, что позволяет в несколько раз сократить время счета;
- энтальпийная форма решения, что приводит к наглядной физической интерпретации результатов и существенно повышает точность определения положения границ промерзания – оттаивания.

Данный метод реализован компьютерной программой «WARM», разработанной на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ (Программа, 1994).

На основе климатических прогнозов с помощью численного решения задачи Стефана составляется прогноз откликов геокриологической системы на климатические изменения в различных регионах криолитозоны

(глава 4), которые затем используются как основа для проектирования инженерных сооружений в этих регионах. Однако, сегодня практика ставит перед проектированием новую задачу – дать оптимальные по стоимости ответы на новые вызовы, т.е. не только обеспечить устойчивость сооружений в условиях изменения климата, но обеспечить её с минимальными трудовыми и материальными затратами. Эта задача перерастает в сложную научную проблему, которая не может быть решена с позиций существующего детерминистического подхода, в силу присущих ему двух существенных недостатков:

- во-первых, этот подход не учитывает вероятностный характер перерабатываемой информации и получаемых результатов, что приводит к занижению или завышению требований, предъявляемых к сооружениям и, как следствие, к материальным потерям;
- во-вторых, метод количественно не оценивает надежность работы сооружения, поэтому экономическое сравнение вариантов проектных решений теряет смысл, ибо варианты, отличающиеся по продолжительности безотказной (надёжной) работы не могут быть сопоставимы по стоимости.

Решение названной задачи может быть получено только с позиций вероятностного подхода, а именно с позиций теории надёжности.

Теория надёжности конструкций в России начала интенсивно разрабатываться с середины 50-х годов, что было стимулировано развитием авиации, затем она стала применяться в судостроении и в высотном строительстве, а в последние 15-20 лет и в фундаментостроении. Однако в последнем случае предпринимаются пока только робкие попытки заменить устоявшиеся детерминистические подходы, нашедшие отражение в многочисленной нормативной литературе, вероятностными подходами. На наш взгляд, такая замена неизбежна, ибо она стимулируется потребностями сегодняшнего дня. Эти вопросы нами подробно разбираются в главах 5 и 6.

В заключение следует отметить, что игнорирование глобального изменения климата, оправдываемое его недостаточной изученностью, может быть чревато серьезными издержками для устойчивого развития и национальной безопасности нашей страны в будущем.

Авторы выражают свою глубокую благодарность канд.геол-мин.н. Л.Н. Максимовой и канд.тех.н. Г.П. Пустовойту за ценные советы и консультации в процессе написании монографии.

Глава 1

Состояние объектов инфраструктуры в области распространения многолетнемерзлых пород

1.1. Объекты инфраструктуры

В России в области распространения многолетнемерзлых пород (криолитозоне) существуют все виды инфраструктуры: промышленные и гражданские здания, автомобильные и железные дороги, нефте- и газопроводы, водоводы, линии электропередачи, тепловые, атомные и гидротехнические электростанции, плотины, дамбы, водохранилища, шахтные стволы, скважины и пр. Общее количество капитальных зданий превышает 15 тысяч, протяженность железных дорог – 6600 км., автомобильных – 9570 км., магистральных газопроводов – 3300 км., нефтепроводов – 1830 км., высоковольтных линий электропередач – 5420 км., крупных гидроузлов – 7. Сооружения объединяются в комплексы, как правило, приуроченным к месторождениям полезных ископаемых. Это Воркутинский угольно-промышленный комплекс, Норильский металлургический комплекс, Якутский алмазодобывающий комплекс, Магаданский золотопромышленный комплекс, Западно-Сибирский газо-и нефтедобывающий комплекс и некоторые другие. Центрами промышленных комплексов являются города Воркута, Норильск, Якутск, Магадан, Надым, Уренгой, Ямбург с населением 100-200 тыс. жителей.

Указанные города имеют современную инфраструктуру: 5-12-ти этажные здания с централизованным отоплением, холодным и горячим водоснабжением, электроснабжением, асфальтированные дороги, бассейны, летние и зимние стадионы, зоны рекреации и пр. При строительстве сооружений применяются два принципа использования многолетнемерзлых пород (ММП) в качестве оснований. В строительной практике более распространено название – многолетнемерзлые грунты (ММГ), под которыми подразумеваются многолетнемерзлые породы, воспринимающие тепловое и механическое воздействие сооружений. Первый принцип (принцип I) использования ММГ заключается в сохранении грунтов в мерзлом состоянии. Второй принцип (принцип II) – в их использовании в талом и оттаивающем состояниях. Первый, как правило, применяется при застройке участков, где слой сезонного промерзания сливается с многолетнемерзлой толщей, второй – где не сливается. Принцип I в основном применен в городах Норильск и Якутск, принцип II – в городах Воркута, Надым, Магадан. На участках, где слой сезонного промерзания-оттаивания не сливается с многолетнемерзлой толщей, в последние 25 лет стал применяться новый способ обеспечения устойчивости зданий – со стабилизацией верхней границы многолетнемерзлых грунтов на первоначальном естественном

уровне. Этим способом в Воркуте было построено и успешно эксплуатируется более 100 пятиэтажных капитальных зданий. При строительстве зданий I-ый принцип включает четыре способа обеспечения их устойчивости (с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии; с предварительным охлаждением пластичномерзлых и промораживанием талых грунтов основания; с промораживанием талых грунтов основания в процессе строительства и эксплуатации здания; с допущением ограниченного оттаивания многолетнемерзлых грунтов выше подошвы фундаментов), II-ой принцип – пять способов (с приспособлением надфундаментной конструкции к неравномерным осадкам основания (конструктивный способ); с предварительным площадным оттаиванием ММГ; с предварительным локальным оттаиванием ММГ; со стабилизацией начального положения верхней границы ММГ с помощью вентилируемого подполья; со стабилизацией начального положения верхней границы ММГ с помощью охлаждающего контура). Способы подробно описаны в учебнике (Хрусталеv, 2005), куда мы и отсылаем читателя.

Санитарно-технические коммуникации в населенных пунктах, как правило, прокладываются под землей в вентилируемых каналах (принцип I) или траншеях (принцип II), на промышленных площадках – над землей (кроме канализации) с применением теплоизоляции.

Дороги устраиваются в основном в одном уровне с прилегающей застроенной территорией и очень редко – в двух уровнях, выше красной отметки земли. Для дорожной одежды используются асфальт, бетон, щебень в смеси с битумом, а также просто щебень или галька. При низких температурах лучше всего себя зарекомендовали мягкие покрытия, а именно смесь щебня с битумом, которые широко применяются в Норильском промышленном районе.

В районах с большим ветровым переносом снега с наветренной стороны застроенной территории устанавливаются стационарные и переносные снегозадерживающие сооружения в виде деревянных щитов. В последние годы для снегозадержания вместе со щитами стали использовать внешний контур самой застройки. Для чего последняя проектируется в виде отдельных аэродинамических групп с пропуском снего-ветрового потока между группами и ветро и – снегозащитой территории внутри группы. Такую планировку можно наблюдать в Норильске и в некоторых районах Воркуты.

При строительстве магистральных трубопроводов применяются также два принципа использования ММГ в качестве основания: принцип I, ему соответствует надземный способ прокладки на высоких и низких опорах и принцип II, ему соответствуют два способа прокладки – подземный (ниже поверхности земли) и наземный (по поверхности земли в обваловке из грунта). Основным видом прокладки является подземный способ.

Принцип I и II используется и при прокладке дорог. Как показывают наблюдения, земляное полотно дорог в большинстве случаев оказывает на грунты основания утепляющее воздействие, что связано с повышенной инсоляцией откосов земляного полотна летом и накоплением на них снежного покрова зимой, счищаемого с проезжей части и перенесенного ветром. Поэтому при реализации принципа I применяется покрытие откосов слоем сортированного камня, который в зимнее время выхолаживает грунт, установка на откосах вентиляционных железобетонных коробов, а также установка вдоль подошвы откоса и на его бермах вертикальных парожидкостных термосифонов при малой ширине земляного полотна и прокладка в основании откосов горизонтальных парожидкостных термосифонов при большой ширине земляного полотна. Однако принцип I применяется редко и в основном дороги возводятся по принципу II.

При проходке устья шахтных стволов иногда устраивается форшахта и реализуется I-ый принцип использования ММГ, это происходит в единичных случаях, обычно шахтные стволы устраиваются по II-му принципу. То же можно сказать о разведочных и эксплуатационных скважинах на нефть и газ.

Грунтовые плотины сооружаются по мерзлому (принцип I) и талому типу (принцип II). Механическая и фильтрационная устойчивость первых во многом зависит от климата, поскольку в них используется естественный холод для поддержания мерзлого состояния грунтов в теле и основания плотины. Эти плотины широко используются на севере и имеют ряд преимуществ по сравнению с плотинами талого типа, однако только в том случае, если будут в проектах плотин учитываться климатические изменения.

Рассмотрим основные объекты инфраструктуры подробнее.

1.2. Населенные пункты и промышленные площадки

Согласно официальным данным к 1984 г. в криолитозоне России насчитывалось 324 населенных пункта (*Атлас СССР, 1985*). Из них с населением 100 000-500 000 жителей – 12; 50 000-100 000 – 8; 10 000-50 000 – 40; меньше 10 000 – 264. Все населенные пункты в криолитозоне представляют собой очаги концентрированного техногенного влияния на природную обстановку, охватывающего значительные территории и приводящего к развитию опасных для устойчивости инженерных сооружений геокриологических процессов (термокарст, пучение, морозобойное растрескивание, наледообразование и пр.). Естественно, что результат этого негативного влияния зависит как от природных условий (климатических, геокриологических), так и от интенсивности антропогенного воздействия. Последнее, как известно, в основном определяется тепловым загрязнением геологической среды. На застроенной территории влияние отдельных сооружений

суммируется, что может приводить как к аградации, так и деградации многолетнемерзлых толщ (ММТ). Проиллюстрируем это примерами.

Воркутинский район. Застроенная территория здесь представлена городом Воркута, рабочими поселками и промышленными площадками угольных шахт. Наблюдения показали (*Хрусталеv, 1971*), что в Воркуте происходит интенсивная деградация ММГ. За время существования города мерзлая толща потеряла 25% своих запасов холода. Деградация сопровождается увеличением размеров чаш и ореолов протаивания грунтов. При высокой плотности тепловыделяющих сооружений в черте застройки и больших снежных отложений на ее территории отдельные чаши и ореолы протаивания сливаются воедино, образуя общее понижение верхней границы ММТ и способствуя появлению тепловых осадков поверхности (термокарста). Такое явление наблюдается на территории квартала № 7 в Воркуте.

Квартал № 7 расположен в центре города. Плотность застройки здесь около 24%. На территории квартала имеется развитая сеть подземных коммуникаций (теплопроводы, линии горячего и холодного водоснабжения, канализация). Зимой территория квартала подвергается сильным заносам снега, мощность которого в отдельных местах достигает 2,5-3,0 м. Высокая плотность застройки и значительная мощность снежных отложений препятствуют оттоку в атмосферу тепла, поступающего за счет солнечной радиации и тепловыделений инженерных сооружений. В результате этого происходит увеличение размеров чаш и ореолов оттаивания в основании сооружений, а за их пределами – отрыв сезонного промерзания от ММТ. Кроме того, вследствие глубокого оттаивания многолетнемерзлых грунтов (ММГ) на территории квартала увеличилась фильтрация грунтовых вод. Грунтовые воды усилили тепловое взаимодействие между отдельными сооружениями, что привело к смыканию чаш и ореолов протаивания с образованием общего понижения поверхности. Верхняя граница ММГ опустилась не только под зданиями, построенными по принципу II, но и под зданиями, построенными по принципу I. Последнее свидетельствует о том, что охлаждения грунтов за счет вентилирования подполий недостаточно, чтобы противостоять общим изменениям мерзлотных условий на застроенной территории квартала № 7. Возможность глубокого повсеместного протаивания мерзлых грунтов не учитывалось при проектировании сооружений, поэтому большинство из них деформировалось (рис. 1.1). Наибольшим деформациям подверглись здания с проветриваемыми подпольями. Аналогичная картина наблюдается и на территории промышленной площадки шахты № 18.

Промышленная площадка шахты № 18 расположена в 12 км западнее Воркуты и приурочена к возвышенному участку рельефа. Размер площадки 200x250 м. Мощность четвертичных отложений здесь около 50 м. Мерзлые грунты на территории площадки распространены повсеместно.

Три четверти ее территории до строительства были заняты участками, где сезонное промерзание сливалось с многолетнемерзлой толщей. На площадке здания и сооружения построены по принципу I и II. В результате теплового взаимодействия между сооружениями, а также теплового влияния грунтовых вод, подогреваемых многочисленными подземными коммуникациями на площадке произошло большое оттаивание ММГ как по площади, так и по глубине. Чаши и ореолы оттаивания слились воедино, образовав общее понижение верхней границы ММГ. За 13 лет эксплуатации шахты верхняя граница ММГ опустилась более чем на 10 м в пределах 33-х % площади от всей площадки, от 5 до 10 м – на 20%, до 5 м – на 27% (рис. 1.2).



Рис. 1.1 Деформация жилого здания, построенного с использованием грунтов основания по принципу II (фото Е.М. Чувиллина)

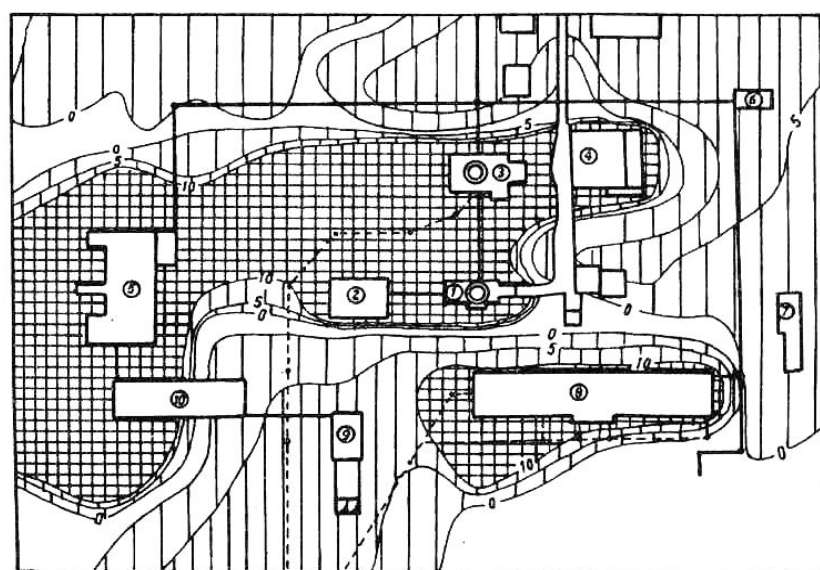


Рис. 1.2

Карта динамики верхней границы ММГ на территории промышленной площадки шахты 18 комбината «Воркутауголь»:

1 – сооружения надшахтного комплекса (в порядке возрастания номеров): надшахтное здание вспомогательного ствола, здание подъемной машины вспомогательного ствола, надшахтное здание главного ствола, здание подъемной машины главного ствола, котельная, насосная станция, электроподстанция, административно-бытовой комбинат, вентилятор, склад; 2 – паропровод; 3 – канализация; 4 – изолиния понижения верхней границы ММГ за 11 лет существования шахты; 5 – участки, в пределах которых верхняя граница ММГ опустилась свыше 10 м; 6 – от 5 до 10 м; 7 – от 0 до 5 м

Таким образом, там, где применяются разные принципы строительства происходит повсеместное оттаивание ММГ.

Иная картина наблюдается на территории квартала 22. Все здания этого квартала построены по принципу I. За 9 лет существования застройки в ее основании произошло поднятие верхней границы ММГ. Причиной данного явления послужило искусственное увеличение площади охлаждающей поверхности вследствие строительства сооружений по единому принципу (рис. 1.3).

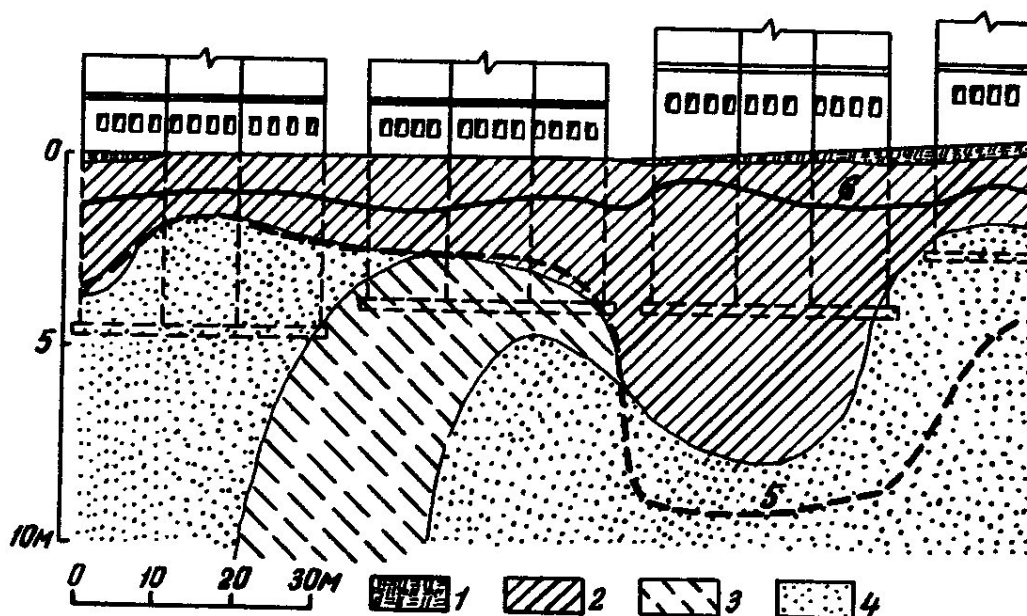


Рис. 1.3 Геокриологический разрез участка квартала 22 города Воркута: 1 – культурный слой; 2 – суглинок; 3 – супесь; 4 – песок; 5 – положение верхней границы ММГ на начало строительства; 6 – положение верхней границы ММГ через 9 лет с начала эксплуатации зданий

Особо следует отметить успешное применение в Воркутинском районе нового способа обеспечения устойчивости зданий – способа стабилизации верхней границы ММГ с помощью вентилируемого подполья (Хрусталева, Никифоров, 1990). Этим способом в поселке Ворга-Шор построено три микрорайона, включающих 66 пятиэтажных крупнопанельных зданий. Способ заключается в том, что под зданием устраивается вентилируемое подполье со средней годовой температурой воздуха равной нулю, а над ним технический этаж. В этом случае глубина сезонного промерзания грунта в подполье равна глубине сезонного оттаивания и в слое сезонного промерзания-оттаивания в течение всего года существует фазовая граница, на которой стабильно поддерживается температура промерзания-оттаивания. Вторая фазовая граница существует на кровле ММГ. Между ними располагается слой талого грунта «буферный слой», где температурные градиенты равны нулю, а следовательно, равны нулю и теплотокки через него, т.е. он является абсолютным теплоизолятором, не пропускаю-

щим в основание тепловые потоки от здания. Подошва фундаментов при этом располагается в «буферном слое». На рис. 1.4. показан поперечный разрез одного из зданий, построенного способом стабилизации, а также подводка к зданию санитарно-технических сетей.

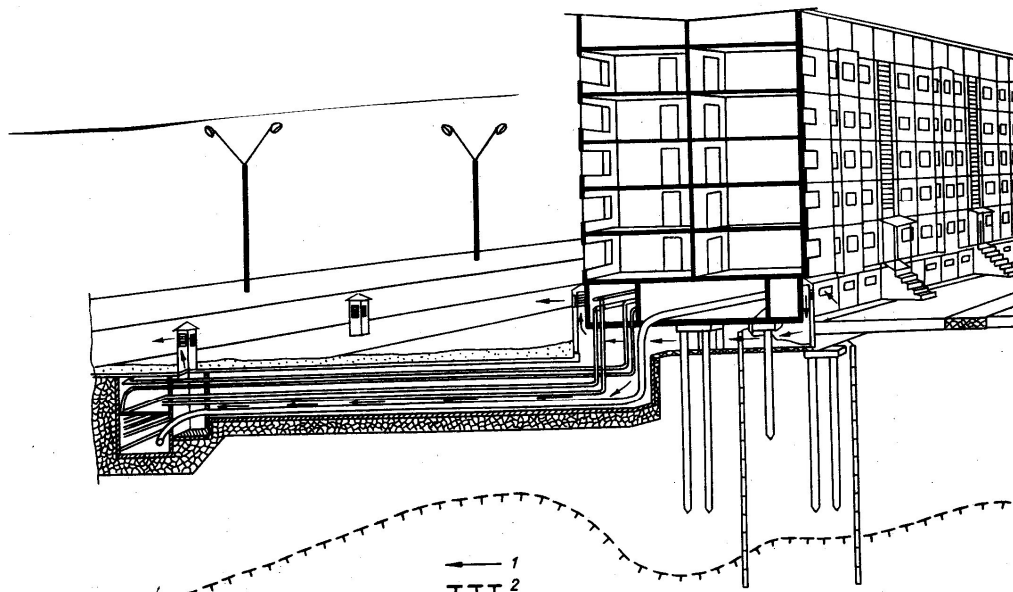


Рис. 1.4 Конструкция жилого здания, обеспечивающая стабилизацию верхней границы ММГ:

1 – направление потока воздуха в вентиляционной системе здания; 2 – положение верхней границы ММГ на начало эксплуатации здания

В основу прокладки санитарно-технических сетей в микрорайонах положен тот же способ стабилизации. Конструктивно он выражается в том, что все сети теплоизолируются и размещаются в подземных вентилируемых наружным воздухом проходных каналах. Режим вентиляции каналов назначается таким образом, чтобы ликвидировать возможность многолетнего оттаивания грунтов за их стенками.

Здания, построенные по способу стабилизации, практически не оказывают теплового влияния друг на друга, поэтому они объединены в группы по несколько зданий, в технических этажах которых проложены внутриквартальные санитарно-технические сети. Кроме того, планировкой сблокированных зданий создана хорошая снего-и ветрозащита внутриквартальной территории.

Вертикальная планировка микрорайонов выполнена в насыпях. Совокупность перечисленных инженерных мероприятий позволило максимально сохранить первоначальную мерзлотную обстановку и тем повысить надежность оснований зданий и инженерных сооружений в микрорайонах в целом. Микрорайоны построены в 1975-1994 г.г. и до настоящего времени аварий сооружений не отмечено. На рис 1.5 показан фрагмент одного из микрорайонов.



Рис. 1.5 Фрагмент микрорайона «Б» поселка Ворга-Шор
(фото Л.Н. Хрусталева)

Норильский район. Раздел написан по материалам статьи (Гребенец, Садовский, 1993).

Район включает города Норильск, Кайеркан, Дудинка, Оганер. Особенностью района является широкое использование принципа I при строительстве зданий и сооружений на нескальных грунтах. Под влиянием хозяйственно освоенных территорий в районе происходит деградация многолетнемерзлых толщ, которая сопровождается повышением их температуры и увеличением мощности слоя сезонного оттаивания. Так, например, за последние 30 лет температура грунта в интервале глубин от 20 до 60 м повысилась на 0,5 °С.

Повышение температуры ММГ по мнению авторов указанной статьи вызвано комплексом факторов, главными из которых являются тепловыделения подземных коллекторов (проходных каналов, в которых проложены инженерные коммуникации), нарушения правил эксплуатации холодных подполий и снежные отложения во дворах.

В Норильске проложено более 60 км. подземных коллекторов; натурные обследования показали, что 20% из них находятся в аварийном состоянии и требуют замены, 70% – в неудовлетворительном состоянии и нуждаются в ремонте. В результате плохой вентиляции подземных коллекторов вокруг них образуются обширные таликовые зоны, служащие путями фильтрации ливневых и аварийных вод. При большой плотности коллекторов на территории городов в грунт поступает большое количество неучтенной проектом тепловой энергии, которая негативно влияет на устойчивость расположенных вблизи зданий. Особую опасность для них

представляют участки тепловых узлов, где осуществляется ввод-вывод санитарно-технических коммуникаций в здания. Натурные обследования, проведенные В.И. Гребенцом, показали, что для 80% всех жилых домов Норильска, Дудинки и Талнаха характерно нарушение геотермических условий в зоне расположения тепловых узлов. Здесь происходит повышение температуры мерзлых грунтов и снижение несущей способности замороженных свай. Зачастую здания и сооружения на этих участках подвергаются существенным деформациям, отмечены даже случаи внезапных обрушений объектов.

Другой причиной деградации мерзлых толщ в черте застройки является плохая эксплуатация холодных подполий. А именно, вентиляционные продухи последних закрываются, чтобы создать более комфортные условия проживания людей на первых этажах. Дело в том, что в Норильском районе принята неудачная конструкция жилых зданий, когда первые этажи расположены непосредственно над холодными подпольями. Кроме того, продухи подполий часто заваливаются снегом, от которого не очищаются. Например, в 55 обследованных в зимний период 1993-94 гг. пяти- и девятиэтажных зданий в Дудинке с середины ноября и до конца зимнего сезона от 60 до 100% продухов для вентилирования были занесены снегом, проветривание фактически не осуществлялось. В результате в холодных подпольях формируется положительная среднегодовая температура воздуха и здания оказывают на грунты основания отепляющее воздействие. Положение усугубляется утечками из коммуникаций, проложенными в подпольях. Со временем число утечек сильно возросло. Так по данным мерзлотной инспекции Норильского комбината, число утечек из коммуникаций в подпольях в 90-е годы увеличилось в 15-20 раз по сравнению с серединой 70-х годов. Тепловое воздействие зданий на мерзлые грунты оснований приводит к оттаиванию грунтов и сопутствующим осадкам, что влечет деформацию надфундаментных конструкций. Деформации конструкций многих зданий и сооружений бывают столь значительны, что объекты выводятся из эксплуатации и подвергаются разборке.

Причиной деградации мерзлых толщ в черте застройки служит также неорганизованная уборка снега с проезжей части транспортных магистралей и пешеходных путей. Снег в Норильском районе не вывозится за пределы городов, а складывается во дворах. Мощность отвалов снега во дворах достигает 8 м, что многократно уменьшает зимнее охлаждение грунтов.

Наличие деградации мерзлых толщ на застроенной территории Норильска явилось причиной деформации 250 зданий, из которых 34 разрушено.

Якутский район. С появлением современной инфраструктуры в городе Якутск началось отепление грунтов основания, повлекшие за собой деформации инженерных сооружений. В настоящее время в Якутске де-

формировалось 300 капитальных зданий. Больше число из них деформировалось по причине оттаивания ММГ, меньшее – по причине охлаждения ММГ и промораживания водоносных таликов.

Оттаивание явилось результатом плохой работы вентилируемых систем здания и подземных санитарно-технических систем, утечек воды из труб, увеличения минерализации грунтовых вод. Охлаждение и промораживание, наоборот – хорошей работы вентилируемых подполий, очистки от снега транспортных магистралей и прилегающих к зданиям территорий. Что касается деформаций по причине оттаивания грунтов, то здесь картина повторяет предыдущие и нами уже описана. Поэтому сразу перейдем к описанию другой опасности – чрезмерному охлаждению.

Одним из главных следствий охлаждения является морозобойное растрескивание грунтов, обусловленное температурными напряжениями. Трещины возникают в суровую зиму и имеют протяженность от десятков до сотен метров, глубину – до 5-6 м., раскрытие – до нескольких сантиметров. Впервые воздействие трещин на инженерные сооружения было отмечено в Забайкалье Н.И. Быковым. Земляное полотно одной из улиц в городе Свободный в начале ноября при температуре воздуха -30°C покрылось поперечными трещинами, расстояние между которыми составило от 10 до 35 м при ширине раскрытия 1-3 см, глубине 40-50 см. Такие же трещины описаны С.Е. Гречищевым в 1964-67 гг. на дорогах в Якутске. Весьма часто наблюдается образование морозобойных трещин в основании зданий, сопровождавшееся деформациями последних. Так, в работе В.Ф. Жукова (1958) описана трещина в основании одного из зданий в городе Чита, которая прошла через кирпичный фундамент и разорвала его. Глубина трещины составила 2,5 м, ширина раскрытия по верху – 1,5 см. В Якутске образование морозобойных трещин наблюдается в 50% всех вентилируемых подполий под зданиями. В ряде случаев их появление сопровождается деформациями свайных ростверков и стен.

Так, например, деформация жилого 5-ти этажного здания по ул. Курашова в Якутске произошла по причине морозобойного растрескивания грунтов основания (рис 1.6). Морозобойная трещина здесь прошла вдоль центральной оси здания и разорвала свайный ростверк. Длина трещины составила более 100 м, глубина – 5 м, ширина раскрытия по верху – 2 см.

В природных условиях в толще мерзлых пород функционируют два вида подземных фильтрационных потоков – в слое сезонного оттаивания и в таликах. Их движение направлено к зонам природных водосбросов – к руслам рек и к озерам. При использовании грунтов в мерзлом состоянии происходит перемерзание природных путей движения грунтовых вод. При этом выше промерзшей зоны возникают наледи, бугры пучения и заболачивание территорий, наблюдаются процессы водной эрозии, ниже формируются термокарстовые полости, провальные деформации поверхности,



Рис. 1.6 *Морозобойная трещина в основании крупнопанельного здания с вентилируемым подпольем в Якутске (фото Л.Т. Роман)*

овраги. Это приводит не только к нарушению устойчивости сооружений, но и к нарушению экологической безопасности территорий в целом. Наглядным примером является территория Якутска, где из-за многолетнего использования вентилируемых подполий и других сезоннодействующих охлаждающих устройств, произошло перемерзание подземных старичных русел, являвшихся природными подземными водостоками к реке Лена. Это вызвало изменение движения подземных вод и их частичный выход на поверхность, привело к заболачиванию территории города, неравномерному оттаиванию мерзлых грунтов и осадкам поверхности. Процессы усугубились нарушением поверхностного водоотвода и массовыми утечками

ми из коммуникаций

Магаданский район. Город Магадан в целом оказывает тепляющее влияние на грунты и если оно заранее не учитывается, то сооружения на этих грунтах деформируются. В Магаданском районе по этой причине деформировалось 65 капитальных зданий.

Во многих населенных пунктах Магаданского района, где ранее велось интенсивное строительство, сегодня отмечается заметное изменение геокриологических условий. Оно приобретает все более опасный характер для устойчивости инженерных сооружений, которые построены с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии. Известны примеры, когда в течение последних 5-10 лет среднегодовые температуры ММГ на застроенных территориях повысились на 0,5-2 градуса, причем зачастую с формированием техногенных надмерзлотных таликов. Такие нарушения характерны для районов со сложным рельефом местности, где планировка осуществлялась крупносkeletalным грунтом. Последняя в большинстве случаев способствует возникновению таликов в результате фильтрации просачивающихся подземных вод и утечек из санитарно-технических сетей. Фильтрационные потоки в таликовых зонах интенсифицируют термокарст и ведут к развитию подземной термоэрозии. Особенности подобных криогенных процессов чрезвычайно слабо освещены в литературе, плохо прогнозируются и практически не учитываются в строительстве.

К вопросу управления температурным режимом грунтов на застроенной территории. Промышленное и гражданское освоение террито-

рии связано с созданием геотехнических систем, под которыми понимаются инженерные сооружения и взаимодействующая с ними геологическая среда. Последняя претерпевает значительные изменения под действием тепловых и механических нагрузок от сооружений. Они особенно существенны в черте застройки, где геотехнические системы объединяются в единый природно-технический комплекс (ПТК). Геофизические процессы, протекающие в ПТК, и их результаты по П.Ф. Швецову можно характеризовать экстенсивными и интенсивными факторами воздействия. К экстенсивным факторам относятся площади контактов теплоисточников или стоков тепла с ММГ; к интенсивным – температуры контакта или величина теплопотока. Математическая модель такого природно-технического комплекса (ПТК) есть полупространство с внутренними процессами кондуктивной и конвективной теплопередачи с фазовыми превращениями влаги, к поверхности которого приложена разная по знаку и величине тепловая нагрузка, выражаемая через температуру поверхности.

Если в грунтовой толще конвективная составляющая теплопередачи пренебрежимо мала и температурное поле определяется только кондуктивным теплопереносом, то легко показать (Хрусталева, 1971), что влияние отдельных тепловых воздействий исчезает уже на глубинах порядка 20-30 м. Сумма тепловых воздействий от группы сооружений приводит к формированию своеобразного микроклимата, к изменению средней за год средневзвешенной (среднеинтегральной) температуры поверхности T_{cp} на всей площади застройки по отношению к исходной среднегодовой температуре многолетнемерзлых пород T_0 , сформировавшейся в естественных условиях. Это изменение оказывает существенное влияние на динамику теплового процесса на любом участке застроенной территории. Оно может приводить к изменению положения в разрезе не только кровли ММГ, но и ее нижней границы, т.е. глубина суммарного теплового влияния может существенно превышать влияние единичного сооружения. Разность T_{cp} и T_0 определяет направленность мерзлотного процесса на застроенной территории. Условию $T_{cp} = T_0$ соответствует равновесие системы в целом, изменения температурного режима многолетнемерзлых грунтов на каждом участке застройки определяются только верхними граничными условиями на данном участке (обычно регулируемые). Если T_{cp} ниже T_0 , то ММТ системы будут находиться в аградационном режиме независимо от верхних граничных условий на отдельном участке застройки, и это будет повсеместно отражаться на положении и кровли, и подошвы ММТ (последнее при условии, когда ширина участка застройки превышает мощность ММТ). В случае T_{cp} выше T_0 система будет находиться в режиме деградации ММТ, что будет также повсеместно сказываться на положении кровли и подошвы ММТ. Если T_{cp} становится выше нуля, то деградация многолетнемерзлых толщ сопровождается образованием таликовых зон даже на тех участках, где верхние граничные условия обес-

печивают существование ММГ (например, в полосе автодорог и т.п.). В последнем случае в верхней части разреза сохраняются отдельные линзы мерзлых грунтов, разобщенные таликами с подстилающей мерзлой толщей.

Изучение опыта освоения территорий в криолитозоне показывает, что, если при определении среднеинтегральной температуры (T_{cp}) учесть также ее зависимость от естественной и техногенной динамики климата, то эта температура становится надежным показателем направленности мерзлотного процесса в природно-технической системе. Искусственно воздействуя на формирование T_{cp} с помощью экстенсивных и интенсивных факторов, можно управлять тепловыми процессами в системах.

Рассмотрим экстенсивные факторы – площади контактов. Они определяются балансом элементов застроенной территории (структурой застройки). Например, если мы имеем дело с жилой застройкой, то ее элементами являются: здания, подземные коммуникации, транспортные магистрали и автостоянки, пешеходные пути, хозяйственные площадки, зеленые насаждения, зоны рекреации.

Площади контактов этих элементов с поверхностью грунта образуют многочисленные источники и стоки тепла. К первым относятся площади, занимаемые зданиями, построенными по принципу II, подземными коммуникациями и зелеными насаждениями (зеленые насаждения в черте застройки аккумулируют снег и оказывают обогревающее воздействие на ММГ). Ко вторым – площади, занимаемые зданиями, построенными по принципу I, транспортными магистралями, автостоянками, пешеходными путями и любыми другими поверхностями, с которых убирается или сдувается снежный покров.

Управлять экстенсивными факторами можно, изменяя структуру застройки, например за счет плотности зданий, дорог, инженерных сетей, и соотношения площадей, подлежащих мелиорации (осушению, засыпке крупноскелетным материалом, озеленению, снегоуборке), разумеется, в пределах градостроительных требований и экономической целесообразности. В этом заключается ограниченность такого регулирования. Согласно градостроительным требованиям, плотность зданий в черте жилой застройки можно изменять от 13 до 24%. В то же время, если здания вводятся по принципу II, их критическая плотность (под критической понимается плотность теплоисточников, обуславливающих деградацию ММГ с разрывом сплошности) составляет 6% в районе Воркуты и 17% в районе Якутска.

Большими возможностями обладают методы регулирования с помощью интенсивных факторов.

В пределах территории, занимаемой зданиями, это производится путем назначения определенного принципа строительства или определенного сочетания принципов строительства. Целесообразность регулирова-

ния теплового режима грунтов на застраиваемой территории зависит главным образом от мерзлотно-грунтовых условий и назначения сооружения. Выбор принципа строительства позволяет изменять температуру поверхности грунта в большом диапазоне, границы которого определяются среднегодовой температурой наружного воздуха и воздуха в помещении. При этом ограниченность подобного регулирования неизбежна. Методы расчета среднегодовой температуры поверхности грунта под зданиями приводятся в монографиях Г.В. Порхаева (1970) и Л.Н. Хрусталева (1971). Влиянием подземных коммуникаций на ММГ управляют путем назначения их способов прокладки (траншейная, канальная) и применения теплоизоляторов. Широкое распространение получила прокладка санитарно-технических сетей в проходном вентилируемом канале. В этом случае среднегодовая температура поверхности грунта в полосе прокладки канала при правильном режиме вентиляции канала становится близкой к нулю.

Мелиорация территории служит одним из мощных средств воздействия на температуру поверхности грунта. Здесь главным является регулирование режима снежных отложений. За счет указанного мероприятия можно понизить температуру поверхности грунта на 4-6 °С. Методы прогноза этой температуры изложены в работах (Кудрявцев и др., 1974; Порхаев, 1970).

В последние годы в составе работ по мелиорации грунтов широко применяется устройство подсыпок из крупноскелетных материалов. Их влияние на температуру поверхности неоднозначно. Оно может приводить как к растеплению, так и к охлаждению грунтов. В то же время сочетание крупноскелетных подсыпок с горизонтальными парожидкостными термосифонами (охлаждающие подсыпки) дает глубокое охлаждение грунтов, температура которых становится соизмеримой со среднезимней температурой наружного воздуха. Новые конструкции термосифонов (Долгих и др., 1991), имеющие длину подземного теплообменника до 800 м, позволяют применять охлаждающие подсыпки не только под зданиями и сооружениями, но и под застройкой в целом, например в пределах всей территории установки комплексной подготовки газа, площадки кустового бурения, резервуарного парка и т.п. Расчет охлаждающих подсыпок приводится в работе (Хрусталев, Пустовойт, 1995).

Таким образом, арсенал технических средств и способов воздействия на формирование среднеинтегральной температуры (T_{cp}) достаточно велик и может обеспечить широкий диапазон ее значений. В связи с этим возникает вопрос: а какой она должна быть?

Сегодня ни у кого не вызывает сомнения, что нарушение природных условий, которое в большинстве случаев имеет необратимый характер, сопряжено со значительными потерями материальных средств и труда. Поэтому при освоении территории следует стремиться к минимуму нарушений. Применительно к рассматриваемой задаче это должно означать, что $T_{cp} = T_0$.

Однако достичь выполнения указанного условия не представляется возможным хотя бы потому, что сама среднеинтегральная температура является случайной величиной и определяется совокупностью действия многих случайных факторов. Ее отклонения от своего номинала при условии $T_{cp} = T_0$ могут привести как к деградации, так и к развитию мерзлых толщ. Поскольку процесс деградации во многих случаях является наиболее опасным с геотехнической точки зрения, то разумно при управлении геотехническими системами стремиться к более низким значениям T_{cp} , чем T_0 по крайней мере на величину ее возможных отклонений.

Выбор средств и их сочетаний для достижения этой цели может быть сделан на основе изучения инженерно-геокриологических условий и прогноза температурного режима ММГ в основании застройки. Очевидно, что исходная геокриологическая ситуация определяет потенциальную тепловую устойчивость грунтов основания и опасность последствий изменения их теплового состояния, не предусмотренных конструктивными решениями (это наблюдается довольно часто на самых разных строительных объектах в процессе их эксплуатации). Для оценки потенциальной устойчивости геотехнических систем может быть использована классификация ММГ по данным изысканий, включающая ряд следующих основных признаков: состав грунтов, слагающих грунтовую толщу (массив); их суммарную объемную льдистость; особенности распространения ММГ в плане с соответствующими значениями среднегодовой температуры и общей мощности ММТ; характер взаимодействия с напорными подмерзлотными водами (в случае их распространения), определяемый наличием или отсутствием непосредственного контакта вод с мерзлыми грунтами. Все эти признаки позволяют принимать принципиальные решения о необходимости управляющих мероприятий. Так, очевидно, что на участках сплошного распространения мерзлых осадочных связных сильнольдистых грунтов со среднегодовой температурой ниже $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и общей мощностью более 100 м будет применен I принцип строительства. При этом управляющие мероприятия будут направлены только на поддержание необходимого положения кровли ММТ. Если на застраиваемой территории распространены аналогичные мерзлые толщи, контактирующие с напорными подземными водами, то управляющие мероприятия должны быть направлены также на поддержание стабильного положения подошвы ММТ. В противном случае при $T_{cp} > T_0$ может начаться интенсивное оттаивание мерзлых грунтов снизу, что в конечном счете может привести к опасной ситуации в геотехнической системе. Вопрос стабилизации нижней границы мерзлых толщ особенно актуально стоит при освоении территорий с прерывистым и островным распространением ММГ со среднегодовой температурой выше $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, со средней мощностью 30-50 (70) м, контактирующих с напорными подмерзлотными водами. Вместо традиционно применяемого в этих условиях II-го принципа строительства, экономически целесообразным может стать I-ый прин-

цип, при котором исключается возможность выхода вод на поверхность и образование наледей.

Для выбора и размещения управляющих средств необходимо, как уже отмечалось, определение среднеинтегральной температуры в черте застройки. Поиск ее оптимального для конкретной природно-технической системы значения возможен на основе прогноза изменения температурного режима поверхности при заданной структуре застройки. Прогноз сводится к решению нестационарной трехмерной тепловой задачи в среде с фазовыми превращениями влаги. Последняя относится к числу наиболее сложных задач математической физики, не имеющих в настоящее время решений. Однако если пренебречь конвективной составляющей теплопередачи, то ее можно свести к трехмерной задаче Стефана и попытаться получить приближенное решение. Такая попытка нами была успешно реализована применительно к описанной выше математической модели ПТК (Хрусталеv, Емельянова, 1996). Пользуясь полученным решением, путем относительно несложных вычислений можно осуществлять прогноз температурного режима ММГ на застроенной территории, что позволяет методом итераций производить выбор средств управления и их оптимальных сочетаний.

Предлагаемая концепция управления тепловым состоянием грунтов в геотехнических системах, основанная на прогнозировании среднеинтегральной температуры поверхности в черте застройки, позволяет минимизировать экологический ущерб от возведения на севере крупных гражданских и промышленных комплексов. Это особенно важно в связи с глобальным потеплением климата. Расчеты показали, что в условиях глобального потепления надежность оснований резко снижается, что приводит к значительному сокращению долговечности и массовым разрушениям зданий (Хрусталеv, Пустовойт, 1993). В связи с этим перед инженерным мерзлотоведением стоит проблема сохранения производственных площадей и жилых помещений в ожидаемых климатических условиях.

Решение этой проблемы заключается в разработке совокупности технических решений по продлению срока службы уже построенных сооружений и обеспечению требуемой долговечности вновь возводимых. Рассмотрим эти задачи в обратной последовательности. Предварительно заметим, что допускать деградацию ММГ на застроенной территории нельзя, ибо в этом случае процесс становится неуправляемым с непредсказуемыми последствиями. Все наши решения должны быть направлены на выполнение условия $T_{cp} < T_0$, что достигается максимальным использованием естественного холода, а в случае его недостатка, то и машинного охлаждения. В последнем случае, как нам представляется, могут быть применены тепловые насосы, которые дадут возможность использовать отбираемую из грунта низкопотенциальную энергию на обогрев зданий (Vlasov, Perlshtein, Khrustalev, 1994).

Остановимся на способах охлаждения грунта. В настоящее время при строительстве зданий по принципу I широко применяются вентилируемые подполья, охлаждающие грунт с поверхности. Однако в этом случае естественное охлаждение используется нерационально. При поверхностном охлаждении большая часть зимнего времени затрачивается на промораживание оттаявшего за лето слоя грунта и период охлаждения многолетнемерзлых грунтов существенно сокращается. Свободна от этого недостатка трубчатая охлаждающая система, укладываемая ниже подошвы слоя сезонного оттаивания, при ней период охлаждения становится равным зимнему. С помощью трубчатой системы можно противостоять глобальному потеплению довольно продолжительное время. Большим преимуществом трубчатых систем является возможность производить охлаждение грунтов и за пределами здания, что в условиях потепления климата является немаловажным. И последнее, трубчатую систему по мере необходимости легко соединять с тепловыми насосами, когда естественного охлаждения окажется недостаточным.

При строительстве по принципу II сооружения столь же уязвимы к любым неучтенным тепловым воздействиям, как и при строительстве по принципу I и для обеспечения их устойчивости традиционными способами требуются большие материальные и трудовые затраты на предварительное оттаивание грунтов основания. Например, глубина оттаивания под обычное жилое здание сегодня в Воркуте составляет около 40 м., а в Якутске – около 30 м. С потеплением климата глубины возрастут. Более перспективным в условия глобального потепления является способ строительства зданий со стабилизацией верхней границы многолетнемерзлых грунтов в их основании. Одним из главных преимуществ нового способа по сравнению с традиционными является то обстоятельство, что он практически нечувствителен к климатическим изменениям, которые сказываются лишь на продолжительности периода между коррекциями модуля вентиляции холодного подполья.

В ближайшие годы в результате потепления климата мы столкнемся с необходимостью проведения массовых ремонтов сооружений для prolongации срока их службы. Ремонтные работы следует начинать с восстановления первоначальных мерзлотных условий в основании сооружений, построенных по принципу I, и с их стабилизации в основании сооружений, построенных по принципу II. При этом могут быть следующие технические решения:

Например, в зданиях, построенных по принципу I с вентилируемыми подпольями, по поверхности грунта в подполье устраивается крупноскелетная подсыпка, в которой укладываются испарители горизонтальных термосифонов. Конденсаторы термосифонов располагаются за пределами подполья и в случае необходимости могут быть соединены с холодильной машиной. В этом случае здание получает дополнительную охлаждающую

систему, которая работает в зимнее время при естественном охлаждении конденсаторов и круглогодично при искусственном. С помощью дополнительной охлаждающей системы восстанавливают первоначальную несущую способность основания.

В зданиях, построенных по принципу II, по их периметру устанавливаются вертикальные термосифоны. Они создают в основании здания охлаждающий контур, который отводит в атмосферу тепло, поступающее к границе оттаивания, и тем стабилизирует положение самой границы. Применение охлаждающих контуров апробировано в Воркуте, где они использованы для стабилизации мерзлотных условий в основании 21-го здания.

После восстановления или стабилизации мерзлотных условий приступают к ремонтам надфундаментных конструкций и в случае необходимости самих фундаментов. Однако все восстановительные работы в большом объеме используют ручной труд, поэтому чрезвычайно трудоемки и дорогостоящи. Во избежание этих затрат следует подать холод в грунт до того, когда начнутся деформации сооружений. В связи с этим большое значение имеет прогнозирование последних и использование результатов прогноза для планирования профилактических работ.

1.3. Магистральные нефте-и газопроводы

Участки магистральных нефте-и газопроводов принято различать по температуре транспортируемого энергоносителя на горячие участки (температура продукта в течение всего года положительная), теплые участки (только среднегодовая температура продукта положительная) и холодные участки (среднегодовая температура продукта отрицательная) (*Справочник*, 1977). К первым относятся нефтепроводы на всем протяжении и газопроводы на небольшом протяжении после компрессорных станций. Ко вторым и третьим – только газопроводы. Холодные участки трубопроводов можно разделить на участки, где температура продукта в течение всего года отрицательная и участки, и где отрицательная только среднегодовая температура продукта, но в течение части годового цикла она принимает положительные значения. Выбор способа прокладки магистральных трубопроводов определяется типом участка и типом местности. Классификация типа местности применительно к трубопроводному строительству приведена в табл.1.1, рекомендуемые способы прокладки – в табл. 1.2.

В табл. 1.2 обобщен освещаемый в русской литературе опыт трубопроводного строительства. Из анализа этого опыта следует, что подземный способ прокладки имеет преимущество перед остальными: он обеспечивает лучшую защиту труб от разрушения в результате возможных взрывов, защищает трубопровод от лесных пожаров, сводит к минимуму экологические последствия аварий, а для газопроводов объем разрушений в результате аварий, не затрудняет миграцию диких животных, не создает препят-

ствий для обеспечения стока поверхностных вод. Однако его повсеместное использование сдерживается мерзлотно-грунтовыми условиями. В частности, при подземной прокладке горячего трубопровода вокруг него образуются большие ореолы оттаивания, и грунт в основании труб проседает, деформируя трубопровод. Для обеспечения его устойчивости в этих условиях требуются дорогостоящие технические мероприятия. Кроме того, в результате оттаивания происходит осадка дневной поверхности и это часто приводит к термокарсту.

Таблица 1.1

Классификация местности применительно к трубопроводному строительству (Справочник, 1977)

Тип местности	Характеристика участка	Относительная просадочность ММГ при оттаивании
I	Бугристые и плоские торфяники и солифлюкционные склоны, грунты сильнольдистые, ММГ сливающегося типа	более 0,1
II	Тундра и лесотундра, местность плохо дренированная, сложена льдистыми суглинками и супесями, ММГ сливающегося типа	0,01 – 0,1
III	Болота, ММГ несливающегося типа, кровля ММГ глубже 8 - 10 м.	0,00 – 0,01
IV	Хорошо дренированные участки террас и гряды, сложенные малольдистыми супесями и песками, ММГ несливающегося типа.	0,00 – 0,01

Таблица 1.2

Рекомендуемые способы прокладки магистральных трубопроводов

Тип участка трубопровода	Тип местности			
	I	II	III	IV
Горячий	Надземный	Надземный	Подземный	Подземный
Теплый	Надземный	Подземный	Подземный и наземный	Подземный и наземный
Холодный	Подземный	Подземный	Наземный	Наземный

В силу чего подземная прокладка горячего трубопровода на ММГ сливающегося типа (тип местности I и II), как правило, не применяется. С другой стороны при подземной прокладке холодного трубопровода вокруг труб образуется ореол промерзания. Если ниже труб находится талый

грунт, то трубопровод может быть разрушен силами нормального пучения. Поэтому подземная прокладка холодных трубопроводов на участках с ММГ несливающегося типа (тип местности III и IV) нежелательна.

Однако это не означает техническую невозможность подземной прокладки трубопроводов в перечисленных выше случаях, если это диктуется технологией или соображениями безопасности. Сегодня уровень знаний и накопленный опыт позволяет осуществлять любой способ прокладки в любых условиях. Вопрос будет заключаться лишь в затратах материальных средств и труда на строительство трубопровода и его последующую эксплуатацию. Отсюда следует, что выбор способа прокладки является технико-экономической задачей, которая решается в каждом конкретном случае отдельно.

Аналогичный подход используется и при выборе самой трассы трубопровода. На решение этой задачи большое влияние оказывают природные условия, поэтому кратчайшее расстояние между начальной и конечной точкой трассы редко бывает оптимальным.

Исходя из экономии средств и труда, трассу стараются выбирать таким образом, чтобы пересечение водных препятствий, гор и болот было минимальным. Трубопровод проводят в обход мест проявления негативных мерзлотных процессов (бугры пучения, участки с активно развивающимся термокарстом, оползнями и солифлюкцией). Если этого достичь не удастся, то руководствуются следующими правилами: бугры пучения надо обходить с низовой стороны, оползневые участки – ниже зеркала скольжения; не рекомендуется прокладывать трубопроводы у подошвы косогора, трассу следует сместить вверх по косогору на расстояние не менее 60 м. или отнести от косогора на то же расстояние.

Кроме экономических соображений при проектировании трассы трубопровода руководствуются технологическими требованиями и требованиями по технике безопасности. Перечислим основные из них:

- не допускается прокладывать магистральный трубопровод в тоннелях и по мостам железных и автомобильных дорог, эстакадам трубопроводов другого назначения и совместно с электрокабелями;
- используя рельеф местности, необходимо обеспечить следующие уклоны труб: для газопровода – не менее 0,003; для трубопроводов, транспортирующих маловязкие и высоковязкие нефти, соответственно – 0,002 и 0,02;
- ширина трассы трубопровода должна быть не меньше: при одной нитке – 6 м, при двух – 12 м, при трех – 18 м и четырех – 30 м;
- пересечение трассы с искусственными и естественными препятствиями производить под углом 60-90 град.;
- при пересечении водных преград нитки трубопроводов трассировать с расширением, при этом расстояние между нитками принимать не

менее 50 м; если ширина водной преграды превышает 70 м, то следует прокладывать резервную нитку;

– переходы через реки, как правило, устраивать на плесах, ниже мостов и других сооружений.

Окончательный выбор трассы производят по минимуму затрат из нескольких вариантов, запроектированных с соблюдением вышеперечисленных требований.

Выше мы рассмотрели теорию вопроса, теперь перейдем к ее практическому воплощению – опыту строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов в криолитозоне, который нами заимствован из монографии «Геокриологические опасности» (Гарагуля и др., 2000).

Из всех способов прокладки трубопроводов наибольшее тепловое воздействие на грунты оказывается при подземном способе прокладки трубопроводов. При транспортировке продукта с положительной среднегодовой температурой (“горячие” и “тёплые” участки) вокруг трубопроводов, уложенных в мерзлые грунты, происходит дестабилизация естественных тепловых процессов и формирование ореолов оттаивания грунтов, размеры которых для трубопроводов диаметром 1220 и 1420 мм в зависимости от инженерно-геокриологических характеристик грунтов и температуры продукта, по данным натурных наблюдений, достигают 3-10 м и более за 7-10 лет эксплуатации. Наибольшая интенсивность оттаивания мерзлых грунтов наблюдается в первые 2-4 года эксплуатации, когда скорость оттаивания составляет от 1,0-1,8 м/год при температуре продукта 20-30 °С до 0,6-1,0 м/год при температуре 5-10 °С.

Геокриологические исследования, выполненные на газопроводах Уренгой-Надым-Пунга, Уренгой-Помары-Ужгород, Ямбург-Елец, нефтепроводах Харьяга-Усинск, Харьяга-Сев.Возей и на межпромысловых газовых коллекторах на Медвежьем и Уренгойском газовых месторождениях показали, что в результате оттаивания мерзлых грунтов происходит образование мощных и протяженных таликовых зон вдоль трубы, что оказывает существенное влияние на гидродинамический режим грунтов, приводит к их интенсивному обводнению и интенсификации эрозионного процесса. Последний, связанный с нарушением поверхностного слоя грунта и последующим выносом мелкозема, образовавшегося после оттаивания мерзлых грунтов, способствует разуплотнению и смещению вниз обваловки трубы. В результате на многих участках происходит потеря устойчивости и всплытие трубопроводов, обладающих плавучестью. Обводнение траншеи за счет притока к ней вод с прилегающей территории как к дрене и всплытие трубы происходит также на участках, сложенных талыми грунтами, но в значительно меньшей степени. Например, на участке 0-250 км газопровода Уренгой-Надым-Пунга общая протяженность участков с полностью или частично обнаженной трубой в результате всплытия составляет на мерзлых грунтах 60-70%, на талых 22-48% (рис 1.7).



Рис. 1.7 Термокарст на горячем участке трассы газопровода Надым – Пунга. В результате оттаивания грунтов трубопровод, уложенный подземно, всплыл (фото А.Б. Осокина)

Строительство и эксплуатация трубопроводов приводит к активизации геокриологических процессов, развитых до их прокладки, а иногда к возникновению новых, ранее не проявлявшихся. Так, до прокладки газового коллектора на месторождении Медвежье процесс термоэрозии практически был развит слабо, а на участке 66-85 км трассы Уренгой-Надым-

Пунга не был развит совсем. После прокладки трубопроводов термоэрозия начала активно развиваться как в виде линейного эрозионного размыва вдоль трубы, так и в виде поперечной эрозии на участках трасс, проходящих на склонах (рис 1.8). Коэффициент пораженности эрозионными процессами достиг 0,16-0,33 на газовом коллекторе Медвежье и 0,11-0,20 на участке газопровода Уренгой-Надым-Пунга.



Рис. 1.8 Термоэрозионный размыв грунта на участке подземной прокладки трубопровода на территории газоконденсатного месторождения Медвежье (фото С.Ю. Пармузина)

На участках бугристых торфяников, кочковатых тундр с болотами и в понижениях рельефа по трассам газопроводов широко развивается процесс заболачивания, чему способствует избыточная влажность при оттаивании мерзлых грунтов, малая величина испарения, близость водоупора – мерзлых грунтов. Если в естественных условиях коэффициент пораженности заболачиванием составляет от 0,04-0,20 (газопровод Медвежье) до 0,11-0,60 (газопровод Уренгой-Надым-Пунга), то после прокладки газопроводов он увеличивается до 0,26-0,44 (газопровод Медвежье) – 0,85-0,91 (газопровод Уренгой-Надым-Пунга).

В результате техногенных геокриологических процессов, связанных с оттаиванием мерзлых грунтов, возникают значительные горизонтальные и вертикальные деформации газопроводов, приводящие к появлению на-

пряженных участков. Отмечаются такие дефекты, как отклонение проектного положения трубы на несколько метров, вертикальные и горизонтальные арки, гофры, змейки и другие дефекты. На вдоль трассовых полосах в результате техногенных нарушений, вызванных прокладкой газопроводов и сопутствующими ей работами (уничтожение древесной растительности, повреждение мохово-растительного покрова, изменение характера снегоотложений и стока поверхностных вод и т.д.), наблюдается увеличение в 1,2-1,6 раза глубин сезонного оттаивания грунтов, развитие термокарстовых просадок глубиной до 1,0-2,0 м, заболачивание территории. В то же время на некоторых участках происходит уменьшение толщины слоя сезонного оттаивания в 1,1-1,3 раза. Возрастает неравномерность пучения грунтов при промерзании сезонного слоя. Ежегодная величина пучения грунтов изменяется на участках трассы Уренгой-Надым-Пунга от 3 до 147 мм. Это, в свою очередь, приводит к выпучиванию трубы газопровода диаметром 1220 мм и толщиной стенок 20 мм на 16-86 мм и появлению в ней дополнительных изгибов, которые достигают 29-86 мм при длине изогнувшейся части трубы от 36 до 60 м. При прокладке вдоль трассовых дорог на залесенных участках в результате вырубки леса происходит промерзание талых грунтов и многолетнее пучение поверхности (увеличение отметок поверхности составляет от 25 до 100 см и более).

Комплекс спровоцированных техногенным воздействием деструктивных геокриологических процессов (оттаивание и осадка мерзлых грунтов, термоэрозия, разуплотнение, заболачивание и т.д.) в наибольшей степени проявляется при подземной прокладке теплых трубопроводов на льдистых мерзлых грунтах. Развитие этих процессов происходит настолько интенсивно, что эксплуатация трубопровода через несколько лет становится практически невозможной.

По данным М.А. Минкина натурные исследования, проведенные на Солёнинском опытно-промышленном полигоне, показали, что, несмотря на ряд технических мероприятий (бронирование мерзлых стенок траншеи грунтом обратной засыпки, формирование насыпи высотой 2,0 м, устройство бентонитовых перемычек, призванных предотвратить нежелательные процессы), через два года после строительства газопровод обнажился на всем подземном участке, а местами всплыл. Ширина траншеи увеличилась от 5-6 до 7-10 м. По бортам траншеи наблюдалось развитие термоэрозии, вдоль трассы – термокарст.

Для уменьшения неблагоприятного воздействия на трубопроводы техногенных геокриологических процессов используются инженерные мероприятия: устройство теплоизолирующих экранов, балластировка или анкеривание трубы, охлаждение грунтов термосифонами и т.д. Однако должного эффекта эти мероприятия, как правило, не дают, и к тому же являются трудоемкими и дорогостоящими. Так, по расчетам П.П. Бородавкина для обеспечения необходимой устойчивости теплого газопровода

диаметром 1420 мм при его подземной укладке в мерзлых грунтах необходимо устанавливать примерно 1100 т специальных железобетонных грузов на 1 км трубы.

Наиболее радикальный путь предотвращения неблагоприятных техногенных геокриологических процессов – это постоянное сохранение мерзлого состояния грунтов вокруг трубопровода, что достигается круглогодичным охлаждением транспортируемого газа до отрицательных температур. Значительные энергетические затраты на искусственное охлаждение газа окупаются повышением пропускной способности трубопроводов и надежностью их эксплуатации.

Вместе с тем, при транспортировке газа, охлажденного до отрицательных температур, возникают новые проблемы, связанные как с промерзанием талых грунтов, пересекаемых газопроводом, так и с обратным промерзанием оттаявших при эксплуатации теплого газопровода мерзлых грунтов. Геокриологические процессы, которые при этом будут происходить, могут привести к значительным деформациям трубопровода.

Так, многолетние наблюдения, выполненные Институтом мерзлотоведения им. акад. П.И.Мельникова СО РАН на газопроводе Маастах-Якутск показали, что в начале подземных участков, следующих за надземными (наземными), температура газа близка к температуре воздуха, поэтому в летний период способствует значительному увеличению глубины сезонного оттаивания мерзлых грунтов, а в зимний вызывает дополнительное охлаждение вмещающих грунтов. Подавляющее большинство аварий газопровода приходится на зимний период, и это позволяет предположить, что при промерзании сезонно оттаявших грунтов вокруг подземного трубопровода напряжения в нем возрастают до критических значений. Практически во всех наблюдаемых точках зафиксированы пучение грунтов и перемещения трубы. За год суммарная величина пучения в зависимости от конкретных геокриологических условий составляет от 46 до 262 мм, вертикальные перемещения трубы до 229 мм, горизонтальные – не более 20 мм. В летний период оттаивание мерзлых грунтов сопровождается их осадкой, достигающей 40-50 мм. В результате неравномерного пучения и поднятия газопровода появляются местные изгибы и соответствующее им растяжение трубопровода (рис 1.9). Наличие циклических перемещений трубы и грунтов вокруг нее приводит к накоплению необратимых деформаций газопровода и снижает его долговечность.

Газопровод Мессояха-Норильск, первый за Полярным кругом, был построен в 1969 году и до настоящего времени успешно эксплуатируется. В то же время, число отказов на 1 км подземной трассы в 40 раз выше, чем для 1 км надземной прокладки. Для уменьшения числа отказов при подземной прокладке горячих трубопроводов иногда вдоль трассы с двух сторон трубы устанавливают термосифоны, которые создают охлаждающий контур, стабилизирующий границу оттаивания (рис 1.10).



Рис. 1.9 Выпучивание подземного газопровод (фото В.В. Лашина)



Рис. 1.10 Подземная прокладка нефтепровода Ванкор – Пурпе с охлаждающим контуром из термосифонов (фото С.Н. Окунева)

Многочисленные наблюдения, выполненные на трубопроводах, показывают, что большинство насыпей на участках наземной прокладки через 2-3 года полностью разрушаются, а труба обнажается. Учитывая, что металл труб, как правило, не рассчитан на воздействие низких зимних температур воздуха, последнее обстоятельство способствует возникновению аварийных ситуаций. Наземная прокладка трубопровода в насыпи, затрудняя сток поверхностных вод, благоприятствует обводненности и заболаченности поверхности на прилегающей территории выше трубопровода и осушению ниже его. На обводненных участках отмечается развитие термокарстовых просадок глубиной до 1,5-2,0 м, на осушенных - пучение поверхности со скоростью 3-5 см/год.

Наибольшую сохранность природных геокриологических условий обеспечивает надземный способ прокладки трубопроводов. При надземном способе укладки непосредственное тепловое воздействие транспортируемого продукта на мерзлые грунты практически исключается, в связи с чем проявление техногенных геокриологических процессов связано, главным образом, с техногенными нарушениями при строительстве трубопровода, при проведении ремонтных работ, а также с изменением характера снегоотложений у опор трубопровода. По данным снегомерных съемок, проведенных на 1-ой нитке газопровода Мессояха-Норильск сотрудниками «Фундаментпроекта» в 1975, сам газопровод, в случае его надземной прокладки, не является препятствием, способствующим образованию снежных заносов. Наоборот, высота снега под трубой из-за удаления древесной растительности и наличия аэродинамического эффекта, как правило, меньше, чем вне газопровода. Снежные наносы наблюдаются лишь в случаях, когда газопровод проходит у подножий склонов с подветренной стороны, а также при незначительной его высоте над уровнем земли. Неравномерное распределение снега у опор газопровода приводит к охлаждению грунтов и сокращению сроков промерзания сезонноталого слоя около одних опор и повышению температур, увеличению глубины сезонного оттаивания – у других. В результате отмечается развитие таких геокриологических процессов, как тепловая осадка грунтов и их пучение.

Вертикальные перемещения опор при осадке и пучении грунтов сезонноталого слоя существенно сказываются, в основном, на устойчивости поверхностных опор трубопровода. Так, на 1-ой нитке газопровода Мессояха-Норильск отмечены пульсирующие перемещения ряжевых и клеточных опор до 5-10 см, причем, во многих случаях неравномерность перемещений приводила к перекосу опор. Для свайных опор при надлежущей заделке в мерзлые грунты вертикальные перемещения, как правило, не наблюдаются. Особенно повышается надежность опоры, если внутри ее находится термосифон (рис 1.11).



Рис. 1.11 *Надземная прокладка нефтепровода Ванкор-Пурпе на низких опорах с термосифонами (фото С.Н. Окунева)*

1.4. Автомобильные и железные дороги

Прокладка дорог в криолитозоне вызывает существенные изменения мерзлотной обстановки. Это обусловлено нарушением сложившихся в природе условий теплообмена поверхности земли с атмосферой в результате удаления растительного покрова, изменения альбедо поверхности и ее водопроницаемости, переформирования снежных отложений и ухудшения стока поверхностных вод. Само земляное полотно существенно меняет условия теплообмена грунта с атмосферой. При этом его верхняя поверхность (проезжая часть на автомобильных дорогах и основная площадка на железных дорогах) усиливает охлаждение грунта зимой за счет искусственного удаления с ее поверхности снега, а откосы наоборот уменьшают его за счет накопления на них снега, счищаемого с проезжей части или основной площадки и в результате метелевого переноса снега. На откосах также увеличивается отопление грунта летом за счет лучистой энергии, приход которой возрастает из-за уменьшения отражательной способности поверхности откоса и ее наклона к горизонту (рис. 1.12).

Таким образом, влияние земляного полотна на грунты основания зависит от соотношения ширины проезжей части или основной площадки и длины откосов. При низких насыпях земляное полотно оказывает охлаждающее влияние на грунты основания, а при высоких – отопляющее. Охлаждение приводит к многолетнему промерзанию талых грунтов основания и их пучению, отопление – к многолетнему оттаиванию мерзлых грунтов и осадкам.

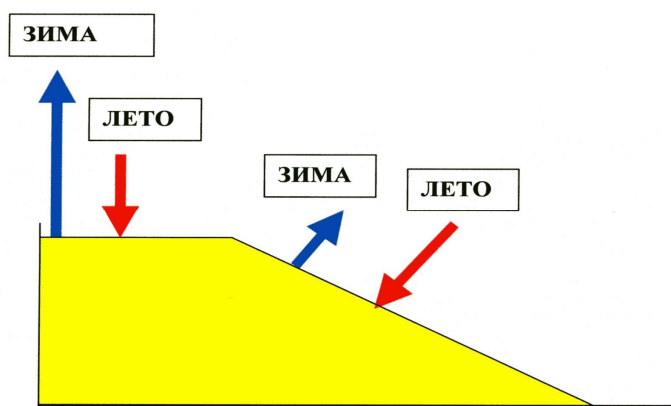


Рис. 1.12
Схема тепловых потоков
через поверхность
земляного полотна

Указанные процессы вызывают деформации земляного полотна и сопредельной территории. Основными видами деформаций являются: осадки и расползания насыпей на оттаивающих ММГ (рис 1.13); термокарстовые понижения дневной поверхности на прилегающих к насыпи территориях; наледи на косогорах, в выемках и руслах водотоков; пучины в выемках и на нулевых местах, в том числе наледного характера (рис 1.14); просадки поверхности дороги в выемках и на нулевых местах; сплывы и оползания откосов насыпей и выемок; заиливание водоотводов в выемках и на косогорах. Часто насыпь взаимодействует с ММГ как нагретый штамп и под ней происходит многолетнее оттаивание ММГ. Многолетнее оттаивание неизбежно влечет за собой осадку дорожной одежды или верхнего строения пути. Осадка проявляется как в виде резких локальных просадок длиной в десятки метров, так и в виде протяженных «волнообразных» участков до 1 км и более. Годовая величина осадки по данным инструментальных наблюдений достигает 10-20 см, что требует постоянных расходов на ремонты. Основной причиной деформаций вначале является многолетнее оттаивание многолетнемерзлых грунтов основания (тепловая осадка). Затем оттаявшие грунты, как правило, обводняются и под действием поездной динамической нагрузки переходят в тиксотропное состояние и выдавливаются из-под земляного полотна (пластическая деформация). Тепловая осадка со временем затухает, что нельзя сказать о пластических деформациях, скорость которых не зависит от времени. Например, на некоторых участках Северной железной дороги незатухающие деформации наблюдаются через 50 лет эксплуатации, а на Забайкальской – через 100, когда процесс оттаивания давно завершился.

По данным П.И. Дыдышко за счет выдавливания слабого слоя на одном из опытных участков железной дороги за три года насыпь опустилась на 60 см. Одновременно с вертикальными перемещениями произошла раздвижка боковых частей насыпи и берм. Интенсивность раздвижки колебалась от 18 до 26 см/год. Для обеспечения устойчивости насыпи создают преграды выдавливанию за счет промораживания грунтов основания или устройства механических препятствий. Оттаиванию ММГ способствует

также удаление или повреждение растительного покрова и отсутствие организованного стока поверхностных вод.



Рис. 1.13 *Осадка земляного полотна на 58 км линии Чум – Лабытнанги в результате оттаивания многолетнемерзлых грунтов основания (фото Е.С. Ашпица)*



Рис. 1.14 *Наледное пучение грунтов на одном из участков БАМ*

Кроме осадок земляного полотна в результате оттаивания ММГ наблюдаются деформации пучения в результате промерзания талых грунтов тела земляного полотна и его основания. Наиболее часто пучению подвергается земляное полотно в выемках, нулевых местах и низких насыпях (до 2-х м) при залегании в пределах слоя сезонного промерзания пучинистых грунтов.

Принимая во внимание вышеизложенное, при выборе трассы дороги всегда стремятся обеспечить ее минимальную протяженность и одновременно проложить в наилучших мерзлотно-грунтовых условиях. Если эти требования исключают друг друга, то задачу решают на основе технико-экономического сравнения вариантов. Расположение трассы считается наилучшим по мерзлотно-грунтовым условиям в следующих случаях:

- 1) большая ее часть проходит по участкам с непросадочными и малопросадочными при оттаивании многолетнемерзлых грунтов (относительная осадка менее 0,1);
- 2) трасса обходит места расположения наледей, термокарста, бугров пучения, солифлюкции и оползней;
- 3) протяженность трассы в пределах бессточных территорий и участков с подземными льдами минимальна.

Как отмечалось выше, ММГ в основании дороги используются по двум принципам – с сохранением мерзлого состояния (принцип I) и с их оттаиванием в процессе эксплуатации (принцип II). При этом оттаивание бывает многолетним и сезонным. Многолетнее оттаивание допускается только на непросадочных ММГ (относительная осадка менее 0,03); сезонное – на непросадочных, малопросадочных и просадочных (относительная осадка менее 0,4). На сильнопросадочных грунтах (относительная осадка более или равна 0,4), а также на косогорах с крутизной более 1:5 и представленных просадочными грунтами многолетнее оттаивание не допускается и здесь реализуется принцип I с охлаждающими устройствами (каменная наброска, вентилируемые короба, термосифоны), рис. 1.15 – 1.17.

Если дорога пересекает участки с негативными мерзлотными процессами, то предусматриваются мероприятия по защите от них земляного полотна, а именно:

Термокарст. Во избежание развития термокарста в пределах полосы отвода дороги все существующие термокарстовые понижения засыпаются торфом или не дренирующим грунтом (засыпка понижений дренирующим грунтом запрещается). Организуется отвод воды из мест, где она застаивается. По возможности сохраняется древесная и кустарниковая растительность, обязательно сохраняется моховой покров. На участках возможного проявления термокарста отсыпка насыпей ведется поверх растительного покрова.



Рис. 1.15 *Каменная наброска на откос на одном из участков БАМ
(автор Г.П. Минайлов, фото Г.П. Минайлова)*



Рис. 1.16 *Вертикальные термосифоны (автор Лонг, фото Е.С. Ашпиза)*

Пучение. Особенно опасно пучение полотна дороги при многолетнем промерзании грунтов, которое может происходить при пересечении дорогой участков с ММГ несливающегося типа. При многолетнем промерзании водоносных горизонтов появляется криогенный напор, который инициирует образование бугров пучения. Во избежание последних устраивают различного рода дренажи для разгрузки напорных вод. Однако дренажи целесообразны лишь до глубины 3,5 – 4,0 м, кроме того, дренаж часто промерзает и не выполняет своих функций. Поэтому более эффективным средством по борьбе с пучением при многолетнем промерзании грунтов являются предзимние откачки грунтовых вод из буровых скважин, которые использовались на трассе БАМ и хорошо себя зарекомендовали как средство борьбы с пучинами инъекционного типа.

Наледи. В зимнее время водотоки, промерзая, могут образовывать наледи, которые представляют большую опасность для дорог (рис. 1.18). По условиям питания различают несколько видов наледей: наледи межмерзлотных и подмерзлотных вод (ключевые наледи), наледи грунтовых вод слоя сезонного промерзания-оттаивания (грунтовые наледи) и наледи речных вод (поверхностные наледи). Ключевые наледи, объем которых может достигать 5-10 км³, трасса дороги обычно обходит, так как борьба с ними обходится очень дорого. Борьба с грунтовыми и поверхностными наледями ведется путем предотвращения или регулирования их образования, а также противоналедной защитой дорожного полотна. Для предотвращения грунтовых наледей устраивают каптаж источников и дренаж грунтовых вод. Эффективным средством борьбы с грунтовыми наледями является также устройство мерзлых грунтовых перемычек, располагаемых в водоносном горизонте с верховой стороны дороги. При малых дебитах источников и выходе их на большом расстоянии от дороги противоналедную защиту создают из снежных валов или временных деревянных заборов, которые отделяют полотно дороги от наледного поля и которые наращивают по мере роста наледи.

С поверхностными наледями борются, утепляя русло реки вблизи мостов льдом и снегом по ледяному покрову, а также увеличивая размеры отверстий мостов и высоту дорожной насыпи на подходе к мосту.

Эти основные положения по устройству дорог в криолитозоне, к сожалению, не всегда находят воплощение на практике, что является одной из причин деформаций земляного полотна. Другой причиной является не учтенное при проектировании повышение температуры наружного воздуха. Разделить эти причины пока не представляется возможным. О важности затронутой проблемы в свете глобального потепления свидетельствуют результаты наблюдений за состоянием земляного полотна на конкретной железной дороге Тында – Новый Ургал, которые показывают, что проблема надежности земляного полотна еще далека от своего разрешения (табл. 1.3)

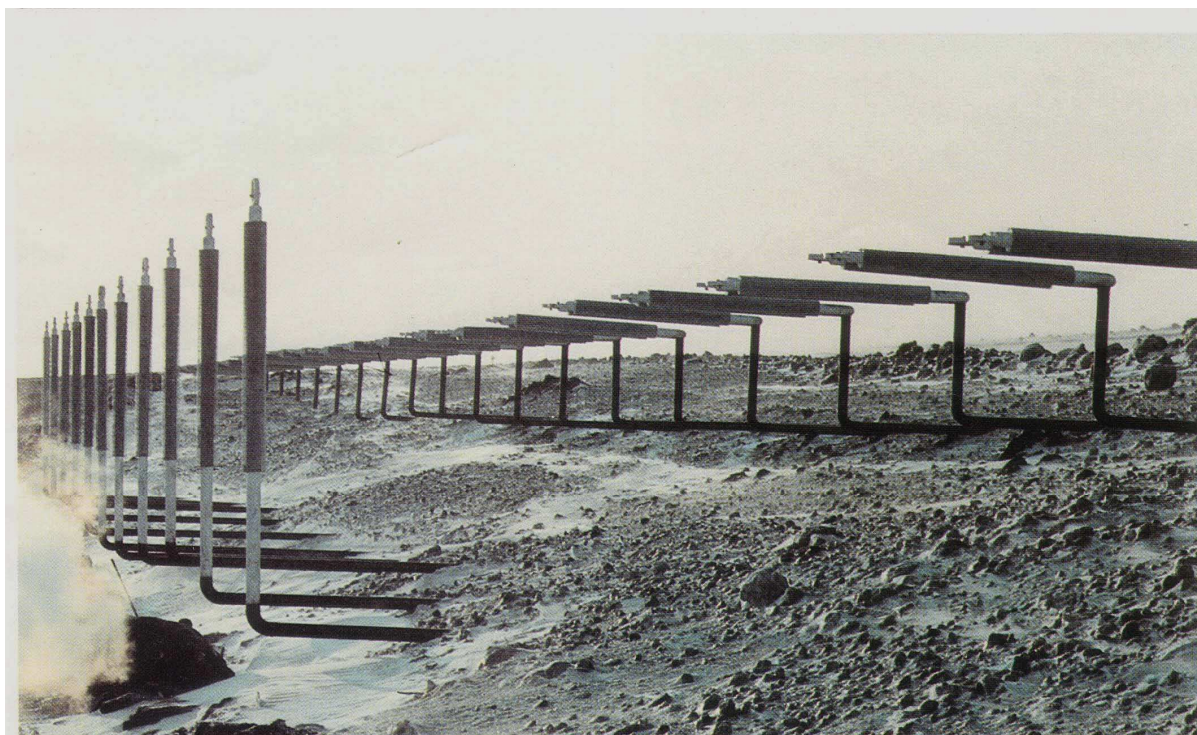


Рис. 1.17 *Горизонтальные термосифоны в земляном полотне и его основании (автор Г.М. Долгих, фото Е.С. Ашпиза)*



Рис. 1.18 *Наледь грунтовых вод (фото Е.С. Ашпиза)*

Таблица 1.3

Осадки на линии Тында – Новый Ургал

Показатель	На 01.1990	На 01.2000
Общая протяженность линии, км	953	953
Количество мест с осадками, шт	586	268
Протяженность мест с осадками, км	321,8	198,2
Отношение протяженности мест с осадками к общей протяженности, %	33,8	20,8

По мнению Л.С. Гарагули, Г.И. Гордеевой и Л.Н. Хрусталева (1997) опасные геокриологические ситуации наиболее часто возникают и наиболее распространены на транспортных магистралях. Это объясняется их особенностями: во-первых, большая протяженность трасс обуславливает ограниченность выбора благоприятных в мерзлотном отношении участков по всей трассе, во-вторых, по ряду причин транспортные магистрали отличаются слабой возможностью управления мерзлотными процессами экономически выгодными средствами. Наиболее часто опасные ситуации можно ожидать на аккумулятивных равнинах в районах с большой динамикой климата, со сплошным и прерывистым распространением дисперсных сильнольдистых ММГ с температурой ниже -1°C и большой пораженностью территории ($>30\%$ площади) мерзлотно-геологическими процессами. На сегодняшний день наиболее опасные территории расположены в основном выше Полярного круга. С потеплением климата ситуация, надо полагать, поменяется в сторону расширения опасной зоны на более южные районы, поскольку повсеместно возрастет динамика климата.

1.5. Вертикальные горные выработки

К вертикальным горным выработкам относятся глубокие разведочные и эксплуатационные скважины и вертикальные шахтные стволы. Температура поступающей в выработку и выходящей из нее среды (воздух, вода, нефть, газ, буровой шлам и др.) практически всегда положительна, поэтому выработка оказывает большое тепловое воздействие на вмещающие ее ММГ. Вокруг выработки образуется ореол оттаивания и ее ствол воспринимает значительные вертикальные и горизонтальные нагрузки, которые часто становятся причиной деформации крепи и потери устойчивости колонны труб. Кроме того, в результате оттаивания ММГ на всю мощность возле выработок часто наблюдаются провалы дневной поверхности с образованием воронок, что приводит к децентрации бурового оборудования, препятствует монтажу фонтанной арматуры, подключению шлейфов, работе станков-качалок. Просадки грунта вокруг шахтных стволов приводят к деформациям надшахтных зданий и расположенных над ними ко-

пров. Кроме того, оттаявший вокруг вертикальной выработки ММГ зависит на обсадных трубах или крепи выработки, образуя несимметричную дополнительную вертикальную нагрузку, так называемое негативное трение, которое часто вызывает продольный изгиб ствола скважины или крепи горной выработки, потерю ими продольной устойчивости и разрушение. Потеря продольной устойчивости обычно происходит в тех случаях, если голова выработки свободно перемещается в горизонтальном направлении. Совокупностью технических мероприятий стараются избежать этого негативного явления, что часто не удается. Силы негативного трения во многом зависят от размеров ореола оттаивания ММГ вокруг вертикальной выработки. Последние в свою очередь зависят от температуры ММГ, с повышением которой они возрастают. В этом отношении глобальное потепление может иметь самые негативные последствия.

Скважины. К конструкции скважины предъявляют следующие требования: она должна обеспечивать, во-первых, надежное крепление ствола кондуктором в интервале залегания мерзлых грунтов, во-вторых, исключать теплообмен между стволом скважины и мерзлыми грунтами. Эти требования учтены в конструкции скважины, разработанной в институте «Гипротюменнефтегаз» (рис. 1.19). Она включает: направление диаметром 426 мм на глубину 20-30 м, наружный кондуктор диаметром 324 мм и внутренний 219 мм на всю мощность ММГ, эксплуатационную обсадную колонну диаметром 168 мм до глубины продуктового пласта и колонну насосно-компрессорных труб диаметром 73 мм. Пространство между внутренним и наружным кондукторами заполняется воздухом или азотом, которые выполняют роль теплоизолятора. Устойчивость устья скважины (направления), пройденной в непросадочных грунтах, при оттаивании ММГ (максимально возможная относительная осадка $\delta_i < 0,03$) обеспечивается устройством вокруг нее подсыпки из крупноскелетного материала мощностью 0,8-1,0 м, такое же решение принимается и на участках с ММГ несливающегося типа. В просадочных грунтах ($\delta_i = 0,03-0,2$) устойчивость обеспечивают перекрытием приустьевой зоны скважины железобетонной плитой и устройством над ней песчаной насыпи, мощность которой превышает мощность слоя сезонного оттаивания грунта. Опорной частью плиты являются грунты, находящиеся вне зоны протаивания вокруг скважины. В сильно просадочных грунтах ($\delta_i > 0,2$) применяют особую конструкцию направления с теплоизоляцией и системой охлаждения (шахтовое направление). При этом используют естественные и искусственные системы охлаждения.

Остановимся на опыте строительства и эксплуатации скважин, пройденных в ММГ, заимствованным нами из работы Березнякова и др. (1997).

Строительство скважин. Сооружение шахтового направления, предшествовавшего бурению скважины, часто приводило к промыву устья по контакту цемента с ММГ в процессе бурения под следующую колонну.

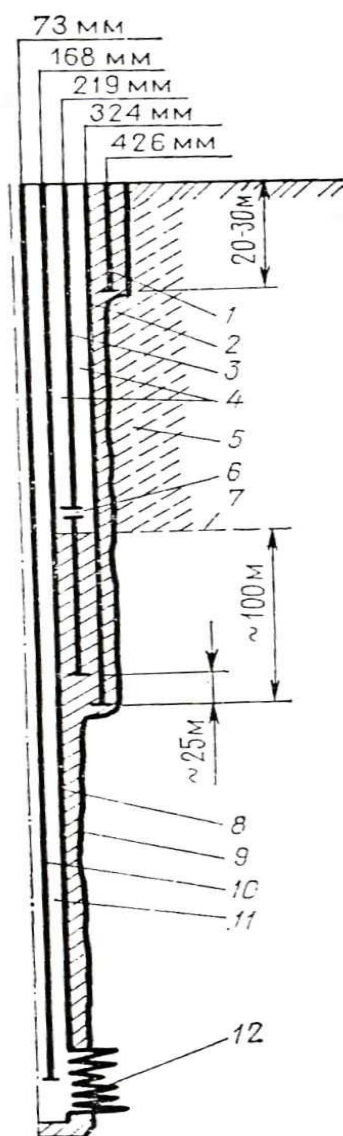


Рис. 1.19 Конструкция скважины с теплоизоляцией ствола:

1 – направление; 2 и 3 – наружный и внутренний кондукторы; 4 – теплоизолирующая воздушная прослойка; 5 – мерзлые грунты; 6 – циркуляционное отверстие; 7 – подошва ММГ; 8 – цементный камень; 9 – эксплуатационная обсадная колонна; 10 – колонна насосно-компрессорных труб; 11 – канал для подъема жидкости; 12 – интервал перфорации

Это имело место на скв. № 4 Нижне-Вилуйской и № 6 Усть-Вилуйской площадей в Якутии; № 3 Долганской и № 1 Гремячинской площадей в Красноярском крае; №№ 52, 304, 305, 307, 403, 409, 410, 421, 603, 610, 615, 627 месторождения Медвежье в Западной Сибири; а также № 102 Возейского, № 1 Лаявожского, №№ 12, 16 Командиршорского месторождений в республике Коми. Основной причиной промыва является некачественное цементирование направлений. В некоторых скважинах наблюдались также промывы кондукторов при бурении под обсадную колонну. Это скв. №№ 59, 78, 82, 83 Возейского; № 34 Лаявожского; № 16 Командиршорского; № 136 Соленинского; №№ 207, 310 Медвежьего месторождений; № 1 Вес-Кюельской и № 3 Долганской площадей. Это осложнение также объясняется некачественным цементированием колонн и плохим контактом с ММГ, и, кроме того, с протаиванием ММГ на контакте с цементным камнем. Имелись также случаи просадки фундаментов и деформации бурового оборудования на скв. № 1 Бодаранской и Нижнее-Вилуйской площадей, № 66 Возеского, №№ 207, 310 Медвежьего месторождений. Эти скважины сооружались на мерзлых песках с большой льдистостью, которые оттаивали при попадании в них бурового раствора и воды.

Особую роль в процессе образования приустевых воронок придается повышенному кавернообразованию в верхней части многолетнемерзлой толщи. Следствием этого являются прихваты инструмента, недоспуск кондукторов, недоподъем цемента. На ряде скважин месторождения Медвежье объем приустевых воронок достигал 100 м^3 , диаметр 6-8 м и глубина 8-10 м. После окончания бурения и засып-

ки воронок песком их рост продолжался длительное время. Из-за образования воронок наблюдались затруднения спуска кондукторов в скв. № 16 Командиршорского, № 123 Соленинского, №№ 203, 209, 213, 217, 301 Медвежьего месторождений. На многих из этих скважин из-за прихватов произошли обрывы низа колонн. По этой же причине происходили прихваты и обрывы инструмента в скв. №№ 58, 61, 66, 80 Возейского, № 34 Лаявожского, № 3 Мишваньского, № 16 Командиршорского месторождений.

При длительной консервации скважин имеются случаи смятия колонн при обратном промерзании оттаявшего грунта, что отмечено в скв. №№ 110, 154 Мессояхского и №№ 3, 22, 130, 138 Соленинского месторождений. Причем вероятность обратного промерзания тем выше, чем ниже температура ММГ.

Эксплуатация скважин. При эксплуатации скважин происходит рост ореолов оттаивания и расширение воронок. В воронки затекают поверхностные воды, что часто вызывает термокарстовые процессы на контактирующих с воронкой площадях (рис. 1.20).

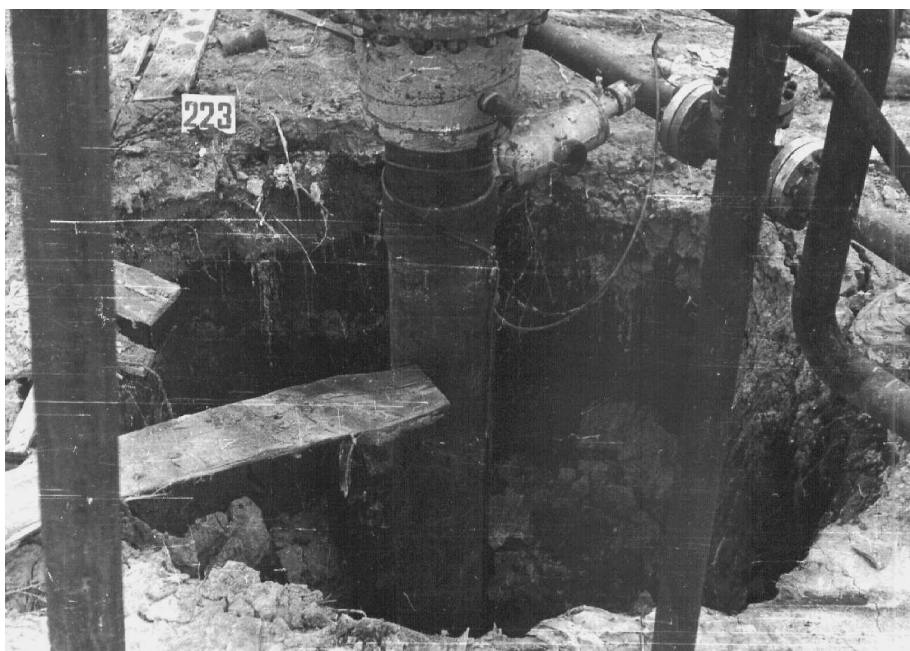


Рис. 1.20 Термокарстовая воронка вокруг газодобывающей скважины на Медвежьем газоконденсатном месторождении
(Фото Л.Н. Решетникова)

Так, например, из 72 обследованных эксплуатационных скважин на месторождении Медвежье только в 15 не наблюдалось термокарстовых образований. В многочисленных работах, посвященных этому вопросу, описаны случаи образования воронок, указываются их размеры, а также дальнейший рост воронок после засыпки их песком, приводящий к искривлению устьевой арматуры, а иногда и к разрыву колонны. Термокарст

отсутствует только на слабобдистых грунтах, однако и в этом случае вокруг скважины образуется ореол оттаивания и сопутствующая ему воронка. Рост ореолов оттаивания продолжается длительное время иногда в течение всего периода эксплуатации и только при низкой отрицательной температуре ММГ размеры ореола оттаивания стабилизируются уже в первые годы эксплуатации.

Таким образом, особенностью строительства и эксплуатации скважин в криолитозоне является оттаивание ММГ вокруг скважин, образование воронок и сопутствующих им осложнений. Существует много методов борьбы с этими осложнениями и в том числе наиболее эффективное – искусственное промораживание грунта в приустьевой зоне. Однако, из этих методов, на практике реализовано только два.

Один из них реализован на скв. № 1 – «Болгохтохская». Основным элементом охлаждающего устройства является вихревая трубка, выполняющая роль генератора холода, где поступающий от компрессора сжатый воздух разделяется на два потока: горячий и холодный. Горячий поток направляется на хозяйственные нужды, а холодный поступает в теплообменную полость и охлаждает сопряженный с шахтовым направлением мерзлый массив, а затем удаляется в атмосферу через выводную линию, совершая полезную работу в воздуховоде по предварительному охлаждению сжатого воздуха.

Второй – на скв. № 100 – «Возей», бурение которой осуществлено в 1977-78 гг. по советско-канадскому торговому соглашению. Основным элементом устройства является рефрижераторное шахтовое направление. Хладоноситель подготавливается с помощью рефрижераторного агрегата, установленного на дневной поверхности. Хладоноситель охлаждается в агрегате до низкой отрицательной температуры и насосом подается в шахтовое направление, затем вновь в агрегат. Система работает по замкнутому контуру. В процессе работы системы температура на границе с мерзлым грунтом составляет минус 6 °С, что обеспечивает плотное смерзание грунтов с наружной поверхностью шахтового направления.

Шахтные стволы. Устойчивость шахтного ствола в ММГ обеспечивают устройством вокруг него бетонной, железобетонной или металлической крепи. Материал крепи и ее толщину определяют расчетом из условия восприятия горного давления и собственного веса с учетом дополнительного давления оттаявшего грунта. По глубине ствол условно разделяют на три участка: устье, от дневной поверхности до первого опорного венца, который обычно располагают на глубине 10-15 м, протяженная часть, от устья до первого сопряжения с горизонтальной выработкой и между горизонтальными выработками, и, наконец, сопряженная часть в пределах горизонтальных выработок. Наиболее ответственными участками являются устье, воспринимающее нагрузку не только горной породы, но и близ расположенных сооружений, и сопряженная часть. Крепь на этих

участках устраивается из железобетона или металла. В протяженной части ствола, составляющей наибольшую часть его длины, крепь обычно устраивают бетонной или железобетонной. Толщина крепи определяется расчетом, но во многих случаях не должна быть больше 0,5 м. Если по расчету она превышает 0,5 м, то бетонную крепь заменяют железобетонной, а железобетонную — металлической.

В устьевой части ствола толща крепи не должна превышать 1,0 м. В связи с этим при больших нагрузках на крепь применяют металлические тубинги. Иногда для снижения нагрузки проводят тампонаж горных пород спустя некоторое время после ввода ствола в эксплуатацию. Цементный раствор нагнетают в скважины под давлением 0,2-0,25 МПа. Скважины бурят как из самого ствола, так и с дневной поверхности по периметру ствола. Однако тампонирование дает положительный эффект только в крупноскелетных грунтах.

Особые требования предъявляются к устройству опорных венцов на контакте с кровлей коренных пород. Венцы должны воспринимать не только вес крепи, но и вертикальную нагрузку со стороны рыхлых грунтов, оттаивающих при эксплуатации ствола (негативное трение). Для обеспечения устойчивости расположенного над стволом надшахтного здания и копра используют сам ствол в качестве фундамента этих сооружений (рис. 1.21, а) или относят фундаменты надшахтного здания за пределы возможного ореола оттаивания вокруг ствола (рис. 1.21, б). Для уменьшения теплового влияния ствола на вмещающие ММГ в его устьевой части устраивают форшахту (рис. 1.21, в), которая представляет собой кольцевую выработку вокруг ствола. Внешним ограждением форшахты служит специальная кольцевая стенка, воспринимающая давление горных пород.

Кольцевой цилиндрический зазор форшахты шириной 1 м доходит до первого опорного венца. В зимний период зазор вентилируется наружным воздухом, который отводит тепло, поступающее от крепи шахтного ствола в грунт. Вентиляция осуществляется за счет общешахтной депрессии, создаваемой шахтными вентиляторными установками. Холодный воздух поступает через вентиляционные отверстия в двух киосках форшахты, проходит по кольцевому зазору и через четыре отверстия поступает в ствол. На глубине 6-8 м он смешивается с потоком наружного воздуха, поступающим через устье ствола, и с подогретым воздухом, подаваемым по специальному коробу от калорифера, расположенного на втором этаже надшахтного здания. В теплый период года входные и выходные отверстия закрывают и форшахта начинает выполнять роль теплоизоляции вокруг ствола, снижающей поступление тепла в грунт. Наличие форшахты полностью исключает многолетнее оттаивание вокруг устья ствола. Сезонное же оттаивание в этом случае не превышает 1,5 м. Необходимо заметить, что передача нагрузки от надшахтного здания на ствол во избежание потери вертикальной устойчивости ствола в оттаявших породах возможно лишь

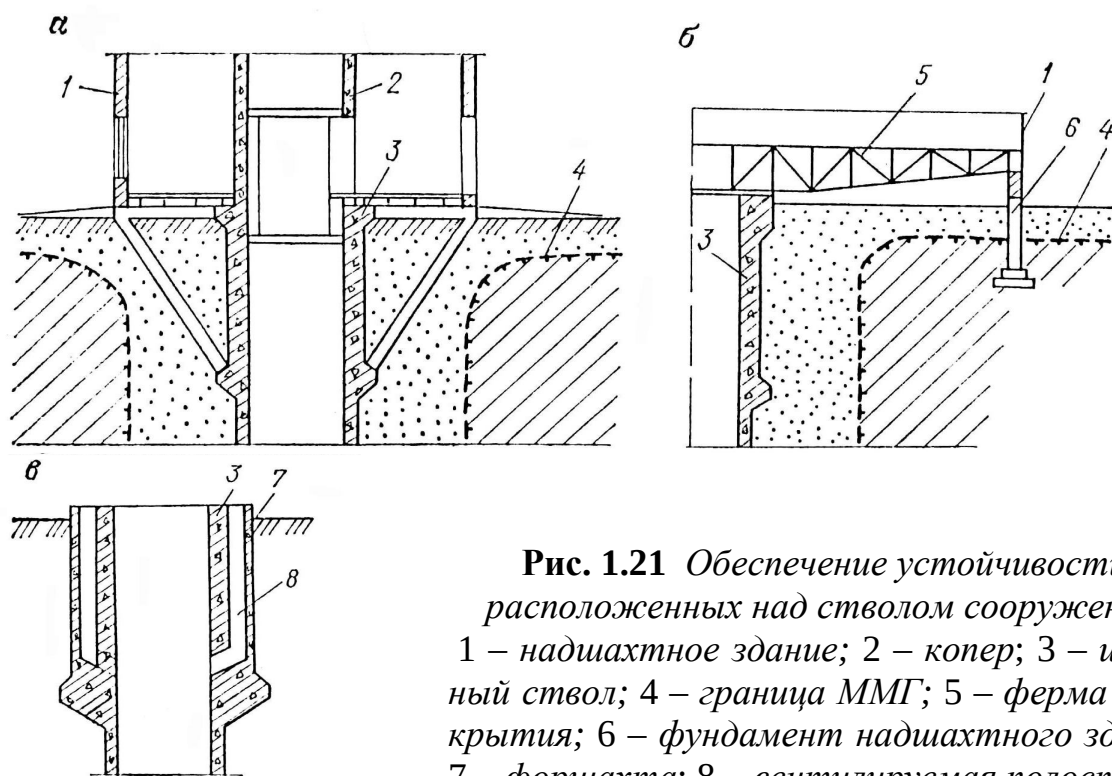


Рис. 1.21 Обеспечение устойчивости расположенных над стволом сооружений:
 1 – надшахтное здание; 2 – копер; 3 – шахтный ствол; 4 – граница ММГ; 5 – ферма перекрытия; 6 – фундамент надшахтного здания; 7 – форшахта; 8 – вентилируемая полость

при неглубоком залегании коренных пород. Наилучшим решением является устройство форшахты, которое практически заземляет устье ствола в ММГ. Однако при этом нельзя допускать даже сезонного оттаивания ММГ вокруг ствола, что достигается теплоизоляцией форшахты и закрытием вентиляционных отверстий в летнее время. К этому же выводу приходит Ф.Я. Новиков (1959), исследовавший температурный режим горных пород за крепью шахтных стволов в Печорском угольном бассейне. По его данным в большинстве случаев деформации и разрушения шахтной крепи и надшахтных сооружений происходит в результате оттаивания ММГ вокруг шахтного ствола (шахты 7, 18, 19, 27 комбината «Воркутауголь»). В процессе эксплуатации шахтных стволов условия работы крепи ухудшаются, вследствие увеличения ореола оттаивания вокруг ствола и возрастания сил негативного трения, что часто приводит к потере продольной устойчивости самого ствола. Во избежание этого явления шейка ствола должна быть закреплена в мерзлых грунтах, что достигается устройством вокруг ствола форшахты и подачей теплого воздуха в ствол ниже первого опорного венца.

1.6. Грунтовые плотины

Плотины являются главным элементом гидроузлов. Они служат для создания водохранилищ и поддержания напора воды. Грунтовые плотины подразделяются по материалу – на земляные, каменно-земляные и каменно-набросные; по конструкции – однородные, возводимые без специаль-

ных противофильтрационных элементов, и неоднородные, тело которых состоит из грунтов двух или нескольких видов; по роду грунтов основания – плотины на скальном основании, на талом нескальном основании, на талом нескальном основании, подстилаемым скалой, на мерзлом нескальном основании, на талом нескальном основании, подстилаемом мерзлыми нескальными грунтами; по способу возведения – на насыпные, намывные, набросные, взрывонабросные; по способу обеспечения водонепроницаемости тела плотины — на мерзлые и талые.

Мерзлые плотины могут быть только земляными и каменно-земляными. Водонепроницаемость мерзлых плотин обеспечивают путем естественного промораживания низовой призмы плотины или естественного и искусственного промораживания ядра плотины и поддержания его в мерзлом состоянии специальными охлаждающими устройствами. Плотины первого вида обычно сооружают в долинах рек, второго — в руслах.

Мерзлые плотины строят на нескальных многолетнемерзлых основаниях, грунты которых отличаются большой сжимаемостью при оттаивании (более 0,15), а также на нескальных талых основаниях, подстилаемых ММГ. Если мерзлая плотина возводится в русле реки, то скорость подруслового потока не должна превышать 2,5 м/сут. Это требование обусловлено техническими возможностями промораживания подруслового потока. Обычно мерзлые плотины на многолетнемерзлом основании строят зимой из мерзлого или талого грунта с его послойным промораживанием естественным холодом.

С момента наполнения водохранилища мерзлый грунт тела плотины со стороны верхнего бьефа начинает оттаивать, что допускается. Однако площадь оттаивания в каждом поперечном сечении не должна превышать 50 % площади тела плотины. Если это условие не соблюдается, то предусматривают дополнительное охлаждение низового откоса с помощью наброски на откос камня, установки на нем вентиляционных коробов или термосифонов. Мерзлотные плотины на талом основании, подстилаемом ММГ, выполняют с центральным ядром из талого глинистого грунта, который уплотняют и промораживают. Для замораживания используют аммиачно-рассольные, воздушные, жидкостные и парожидкостные установки.

Талые плотины могут быть земляными, каменно-земляными и каменно-набросными. Водонепроницаемость талых плотин обеспечивают созданием противофильтрационного экрана или ядра. Такие плотины сооружают на скальных и нескальных основаниях, находящихся как в талом, так и в мерзлом состоянии. В последнем случае сжимаемость грунтов основания при оттаивании не должна превышать 0,15.

По данным Г.Ф. Биянова (*Биянов и др., 1989*) в криолитозоне России эксплуатируется 25 мерзлых и 44 талых плотин. Талые плотины по способу возведения и своей конструкции мало, чем отличаются от плотин, воз-

водимых в средней полосе и с точки зрения климатических изменений большого интереса не представляют. Другое дело мерзлые плотины и особенно те, где для поддержания мерзлого состояния используется естественный холод. Здесь климатическое потепление может повлечь потерю фильтрационной устойчивости сооружения.

Остановимся на мерзлотных плотинах более подробно. Эти плотины являются гидротехническими сооружениями принципиально нового типа. Первая в современном представлении такая плотина была построена в Норильске в 1943 г. Конструкция тела этой плотины в сущности еще не отличалась от плотин талого типа: плотина отсыпана из песка с устройством глинистого ядра с зубом, перекрывающего подрусловый талик, и понура с зубом у подошвы верхового откоса; низовая призма из песка опирается на дренажную призму из камня; верховой откос в расчете на осадку оттаивающего основания выполнен с заложением 1:5. Вместе с тем, плотина содержит воздушную замораживающую систему в ядре и зубе и ледник с вентиляцией в зимнее время наружным воздухом на низовом откосе. В настоящее время плотина находится в удовлетворительном состоянии.

Вторая плотина построена в 1951 г. недалеко от первой на реке Наледной. Здесь учтен опыт эксплуатации первой и внесены коррективы в конструкцию: традиционные грунтовые противофильтрационные элементы исключены, оставлено лишь небольшое глинистое ядро-шпонка; дренаж исключен; вместо ледника на низовом откосе устроен солнце- и снегозащитный навес; упорная призма сооружена из комьев мерзлого грунта. Замораживающая система установлена в ядре и принудительно продувается наружным воздухом в зимнее время. Замораживающие колонки установлены с шагом 3,0 м и имеют диаметр 0,2 м (рис.1.22).

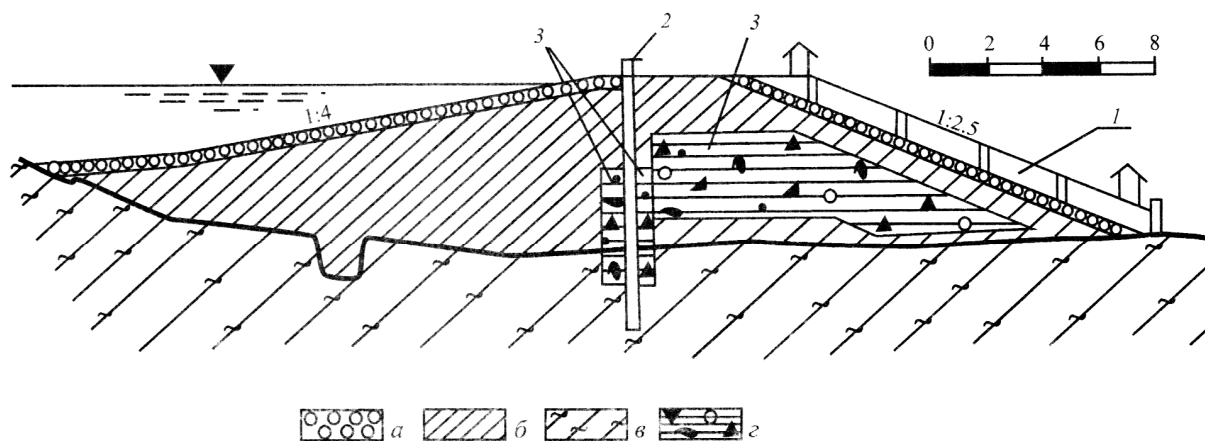


Рис. 1.22 Грунтовая плотина на р. Наледной (рисунок заимствован из книги. Г.Ф. Биянов и др., 1989):

- 1 – вентилируемый навес, 2 – воздушные охлаждающие установки,
3 – глинобетонное ядро, а – гравий, б – мерзлый суглинок тела плотины,
в – плотный мерзлый суглинок оснований, г – глинобетон

В течение двух зимних сезонов эксплуатации плотины тело ее приобрело температуру -2°C , подрусловой талик реке Наледной был полностью проморожен, в основании и в низовой призме установилась устойчивая отрицательная температура. Эталон мерзлой плотины считается плотина на реке Ирелях возле города Мирный, построенная в 1964 г. Конструктивные особенности плотины заключаются в следующем: ядро распластанного типа из суглинка имеет зуб, прорезающий илы до кровли коренных пород. Верховая и низовая призмы отсыпаны из песка. Крутизна верхового откоса 1:4 плюс две бермы шириной 15 м; крутизна низового откоса 1:3. По гребню и низовому откосу плотины уложен теплоизоляционный слой из мохо-растительной смеси, который способствует поддержанию мерзлого состояния низовой призмы. По оси плотины установлена воздушная замораживающая система, которая прорезает тело плотины, слой илистых грунтов в ее основании и заглубляется в коренные породы на 5-10 м (рис. 1.23). Через 15 лет эксплуатации плотины температура ядра составляла $-10-15^{\circ}\text{C}$, а грунты низовой призмы находились в мерзлом состоянии.

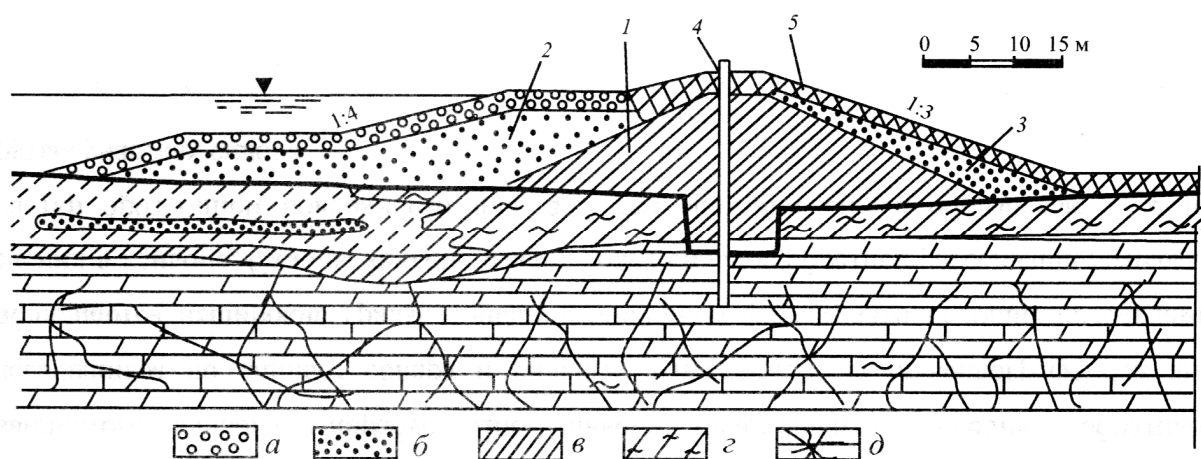


Рис. 1.23 Грунтовая плотина на р. Ирелях (рисунок заимствован из книги Г.Ф. Биянов и др., 1989):

1 – ядро плотины, 2 – верховая песчаная призма, 3 – низовая призма, 4 – воздушно-охлаждающая установка, 5 – теплоизолятор из мохо-растительного покрова, а – гравий, б – песок, в – иловатые суглинки, д – известняки и доломиты трещиноватые

Опыт эксплуатации плотин мерзлого типа показывает, что суглинистое ядро и зуб являются желательным элементом плотины, которые повышают ее надежность и уменьшают риск потери фильтрационной устойчивости плотины при отказе замораживающей (охлаждающей) системы. Последняя должна располагаться по оси плотины на глубину залегания мерзлых грунтов, а также по поверхности низового откоса.

Несмотря на то, что в приведенных примерах использованы воздушные замораживающие системы, их нельзя считать оптимальными, поскольку вследствие замерзания конденсата в трубах часто образуются ледяные пробки, которые выводят систему из строя. Более перспективными являются парожидкостные термосифоны, работающие в замкнутой системе и свободные от этого недостатка. Что касается охлаждающего устройства по гребню и низовому откосу плотины, здесь, на наш взгляд, более приемлемы решения с теплоизолятором, они просты в исполнении и надежны в работе.

Все эти системы используют естественный холод, поэтому зависят от его количества. Потепление климата снизит эффективность замораживающих (охлаждающих) систем и может привести к потере их механической и фильтрационной устойчивости. В связи с этим, потепление должно учитываться при проектировании грунтовых плотин мерзлого типа.

Выводы.

1. Все объекты инфраструктуры в криолитозоне представляют собой очаги концентрированного техногенного влияния на природную обстановку, охватывающего значительные территории и приводящего к развитию опасных для устойчивости инженерных сооружений геокриологических процессов. Результат этого негативного влияния зависит как от природных условий (климатических, геокриологических), так и от интенсивности антропогенного воздействия. Последнее, в основном, определяется интенсивностью теплого загрязнения геологической среды.

2. В условиях потепления климата надежность объектов инфраструктуры снижается, что, в свою очередь, приводит к снижению их долговечности и массовым деформациям. Наиболее уязвимыми к климатическим изменениям оказываются объекты, построенные с использованием грунтов оснований по принципу I.

В связи с потеплением климата перед инженерным мерзлотоведением стоит проблема сохранения надежности уже построенных объектов и обеспечение надежности вновь возводимых в новых климатических условиях с минимальными материальными и трудовыми затратами.

Глава 2

Современная динамика среднегодовой температуры воздуха и геокриологические условия рассматриваемых районов

2.1. Современная динамика среднегодовой температуры воздуха

Известно, что изменения среднегодовой температуры воздуха во времени имеют достаточно хорошо выраженный ритмический характер. Анализ результатов метеонаблюдений, проведенных многими исследователями, позволили выявить периоды повышения и понижения среднегодовой температуры воздуха на территории России с конца XIX и до начала XXI века. Низкие среднегодовые температуры воздуха отмечались в конце XIX, начале XX века. Затем был период некоторого повышения среднегодовых температур воздуха, имеющий пик повышения в разных районах России в 1935-1945 годах. Далее, до середины-конца 1960 годов имело место понижение значений среднегодовой температуры воздуха и, начиная с этого периода, практически по всем метеорологическим станциям (метеостанциям) отмечается ее повышение. В ряде районов это повышение продолжается и до настоящего времени. Приуроченность пиков повышения и понижения температуры и амплитуды этих пиков носят региональный характер, однако в целом тенденции потеплений и похолоданий достаточно хорошо согласуются в различных регионах.

Для анализа современного состояния криолитозоны России и прогноза изменения температурного режима многолетнемерзлых пород в будущем были проанализированы результаты метеонаблюдений за среднегодовой температурой воздуха более чем по 70 метеостанциям, расположенным в различных районах криолитозоны России и вне ее, вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород. В данном разделе приводятся данные по некоторым метеостанциям, имеющим наблюдения за относительно длительный период времени для районов Европейского Севера России, Западной, Средней и Восточной Сибири, Забайкалья и Амурской области. Анализировались данные с начала проведения наблюдений до 2009 г.

Для того чтобы исключить влияние «случайных» ежегодных колебаний температуры воздуха для анализа динамики температурного режима в многолетнем плане, температурные кривые обычно сглаживаются трех- или десятилетним фильтром. В нашем случае сглаживание проводилось 10-летними скользящими температурами. Результаты проведенного анализа динамики значений среднегодовой температуры воздуха подтверждают сделанные ранее многими исследователями выводы, однако увеличение срока наблюдений по всем рассматриваемым станциям до 2009 г. несколько их уточняют.

Европейский Север России. Использовались результаты наблюдений за среднегодовой температурой воздуха по метеостанциям Малые Кармакулы (Южный остров архипелага Новая Земля), данные с 1897 г., Канин Нос (данные с 1916 г.), Воркута (данные с 1927 г.), Архангельск (данные с 1881 г.), Нарьян-Мар (данные с 1927 г.) Сглаженные 10-летние скользящие температурные кривые приведены на рис. 2.1. Анализ кривых на рисунке показывает, что общая тенденция динамики среднегодовой температуры воздуха в регионе сохраняется для всех пунктов, как по широте, так и по долготе местности. Максимальные значения среднегодовой температуры воздуха отмечаются в 1935-1945 гг., минимальные – в конце 1960 г. Затем начинается устойчивое повышение значений среднегодовой температуры воздуха, которое продолжается и до настоящего времени. Амплитуды перепада сглаженных кривых среднегодовой температуры между максимальными и минимальными значениями, не учитывая период до 1935-1940 гг., колеблются от 1,3 °С по метеостанции Канин Нос до 2,2 °С по данным метеостанции Малые Кармакулы.

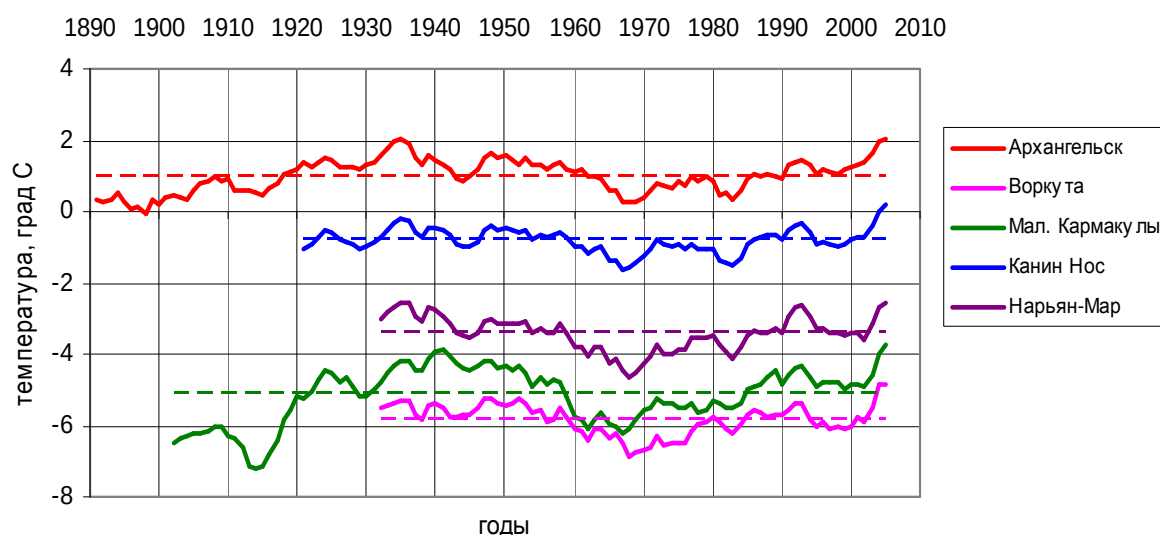


Рис. 2.1 Динамика 10-летних скользящих кривых температуры воздуха по некоторым метеостанциям Европейского Севера России (здесь и далее пунктиром показаны средние значения температуры воздуха за период метеонаблюдений)

Повышение среднегодовой температуры воздуха происходит достаточно равномерно, за исключением периода с 1995 по 2000 гг., когда отмечается относительная стабилизация температурного режима. Отмечающееся в последние годы потепление климата либо соответствует максимуму 30-40-х годов, либо незначительно его превышает. Более подробно характеристика современного потепления климата будет дана ниже.

Западная Сибирь. Анализировались данные наблюдений по метеостанциям Марре-Сале (с 1915 г.), Салехард (с 1883 г.), Дудинка (с 1907 г.), Тарко-Сале (с 1937 г.), Сургут (с 1885 г.). Сглаженные 10-летними сколь-

злыми кривыми значения среднегодовой температуры воздуха для этих метеостанций показаны на рис. 2.2. Из рисунка следует, что основные тенденции динамики температурного режима воздуха близки к выявленным для Европейского Севера. Максимальные значения среднегодовой температуры характерны для 40-х годов и настоящего времени, минимальные – для середины-конца 60-х годов прошлого века. Амплитуда температуры за это период составляет 2,0-2,2 °С. Начиная с середины-конца 60-х годов происходит повышение значений температуры воздуха. На температурных кривых фиксируются два максимума – в начале 90-х годов прошлого времени и в настоящее время. В отрезок времени с начала 90-х годов до начала 2000-х годов отмечается либо некоторое понижение значений среднегодовой температуры воздуха, либо их стабилизация. В целом значения среднегодовой температуры воздуха к настоящему времени остаются ниже, чем отмечались в период максимума 40-х годов. Некоторое отличие отмечается по данным метеостанции Сургут. Здесь повышение среднегодовой температуры воздуха начинается также в середине-конце 60-х годов и практически заканчивается к началу 80-х годов. Далее до настоящего времени устойчивого повышения температуры не фиксируется. Это повышение среднегодовой температуры превышает все ранее зарегистрированные максимумы.

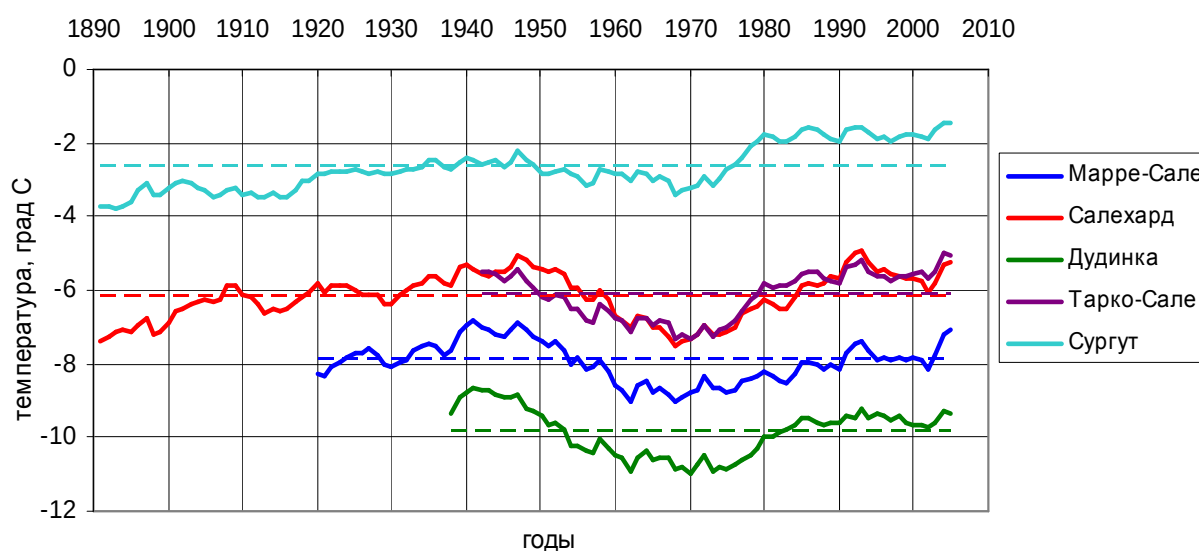


Рис. 2.2 Динамика 10-летних скользящих кривых температуры воздуха по некоторым метеостанциям Западной Сибири

На территории Средней и Восточной Сибири проанализированы наблюдения по метеостанциям Саскылах (с 1936 г.), Якутск (с 1883 г.), Верхоянск (с 1886 г.), Чульман (с 1928 г.). Результаты обработки метеонаблюдений показаны на рис. 2.3.

Как видно из рис. 2.3 динамика среднегодовой температуры воздуха по результатам наблюдений на этих метеостанциях (м.с.) существенно от-

личается от данных по Европейскому Северу и Западной Сибири. До начала середины 60-х годов по наблюдениям на м.с. Якутск практически не отмечается резких перепадов среднегодовой температуры воздуха. Максимальная амплитуда колебаний температуры не превышает $0,7^{\circ}\text{C}$. По наблюдениям на м.с. Верхоянск эта амплитуда составляет $1,2^{\circ}\text{C}$. С начала-середины 60-х годов на обеих метеостанциях отмечается достаточно резкое повышение среднегодовой температуры воздуха. Причем максимум повышения температуры воздуха, который отмечается в настоящее время, значительно превышает те значения, которые были зафиксированы в период 30-40-х годов прошлого века и, кроме того, превышает среднемноголетнее значение среднегодовой температуры воздуха. Максимальное повышение среднегодовой температуры воздуха для района Чульмана отмечается с начала 90-х годов и составляет по сравнению с серединой 60-х годов прошлого века около 3°C . Для района Якутска повышение среднегодовой температуры воздуха достигает максимума к настоящему времени и составляет около $2,5^{\circ}\text{C}$. Для района Верхоянска максимум потепления приурочен к середине 90-х годов прошлого века и составляет около $2,4^{\circ}\text{C}$. Далее, до настоящего времени отмечается тенденция к незначительному понижению среднегодовой температуры воздуха.

Существенно иные закономерности характерны для самого северного из рассматриваемых пунктов – м.с. Саскылах. По данным метеонаблюдений с момента открытия метеостанции отмечается не повышение, а понижение среднегодовой температуры воздуха. Лишь с середины 70-х годов до настоящего времени заметно потепление с трендом около $0,05^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

В чем-то сходные закономерности динамики температурного режима воздуха проявляются и для районов Забайкалья и Амурской области. Для этих территорий анализировались результаты наблюдений по трем метеостанциям (м.с.) – Чита (с 1891 г.), Сковородино (с 1926 г.) и Джалинда (с 1936 г.). Результаты обработки метеоданных показаны на рис. 2.4. По данным м.с. Чита, имеющий наиболее длительный ряд наблюдений, характерен четко выраженный минимум среднегодовой температуры воздуха в середине 30-х годов прошлого века, затем до середины 40-х годов идет повышение ее значений. Далее, до середины 70-х годов, фиксируется период относительной стабилизации температурного режима и начиная с этого времени начинается резкое повышение среднегодовой температуры воздуха, которое продолжается и до настоящего времени. Среднегодовая температура воздуха за это период повысилась примерно на $2,2^{\circ}\text{C}$ по сравнению с периодом середины 70-х годов.

По наблюдениям на м.с. Сковородино и Джалинда аналогичное резкое повышение среднегодовой температуры воздуха характерно для интервалов времени с середины 70-х годов до середины 90-х. Затем тренд повышения среднегодовой температуры стабилизируется. Следует отметить, что современное потепление климата по данным этих метеостанций

значительно выше, чем значение среднегодовой температуры в многолетнем плане. Современный тренд потепления аналогичен районам метеостанций Якутск и Верхоянск.

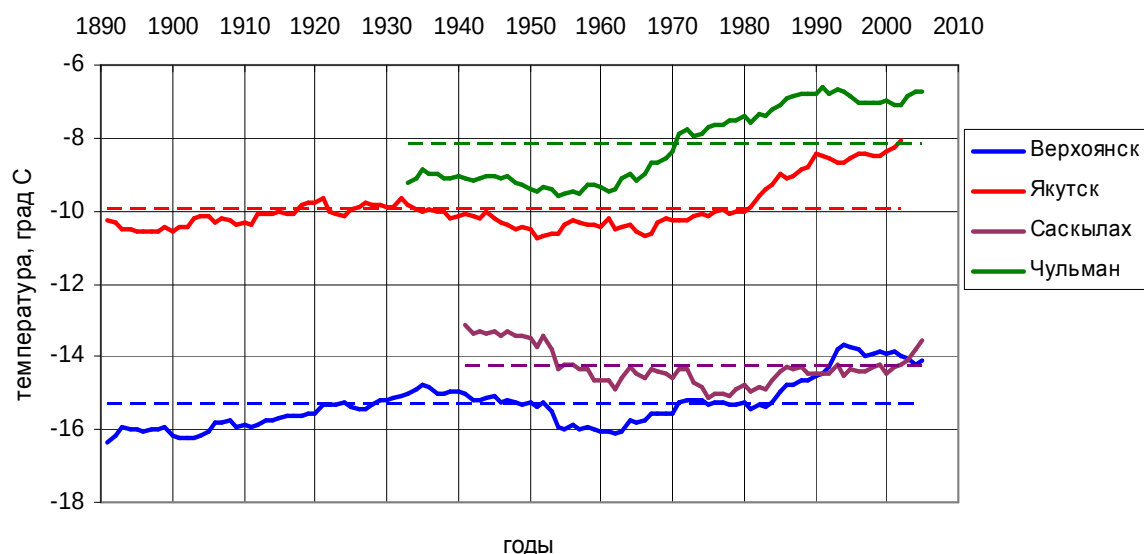


Рис. 2.3 Динамика 10-летних кривых скользящих температуры воздуха по метеостанциям Средней и Восточной Сибири

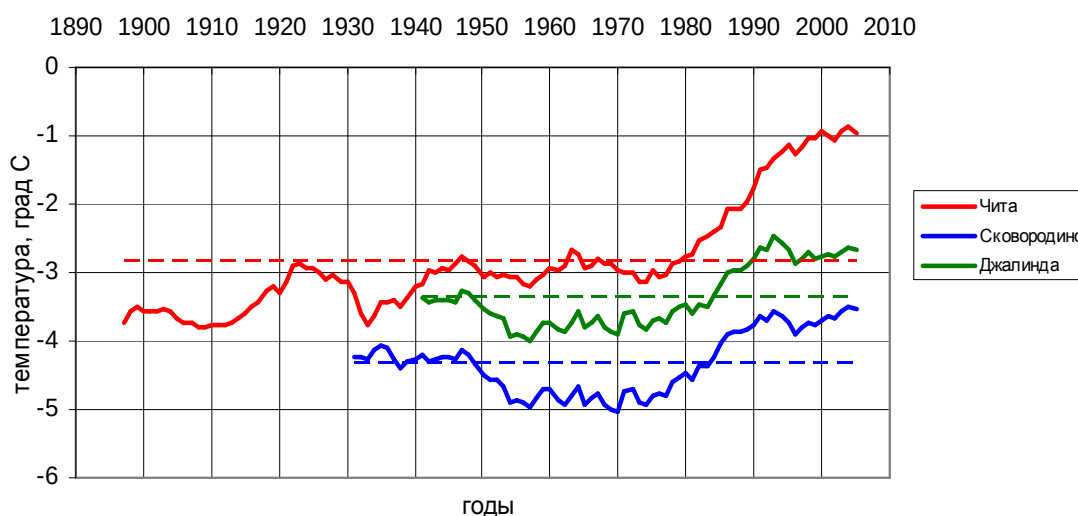


Рис. 2.4 Динамика 10-летних кривых скользящих температуры воздуха по некоторым метеостанциям Забайкалья и Амурской области

Температурный режим воздуха на территории **Северо-Востока России** охарактеризован по данным м.с. Анадырь (с 1899 г.) и Марково (с 1895 г.). Результаты обработки метеоданных показаны на рис. 2.5. Как видно из рис. 2.5, для обеих метеостанций максимальные значения среднегодовой температуры, не беря в расчет более ранние данные, фиксируется в конце 40-х годов прошлого века. Затем температурный режим воздуха находится в относительно стабильном состоянии, далее температурные кривые в зна-

чительной степени повторяют друг друга. Минимальные значения среднегодовой температуры по этим станциям фиксируются в середине 70-х годов. Перепад среднегодовой температуры воздуха между максимальными и минимальными ее значениями составляет за этот период для м.с. Анадырь 0,8-0,9 °С, для м.с. Марково 0,6-0,7 °С. Начиная с 70-х годов до настоящего времени, отмечается повышение температуры воздуха, которое в самом начале 90-х годов по обеим станциям сменяется относительно непродолжительным периодом похолодания. Повышение значений среднегодовой температуры воздуха за период с 70-х годов до настоящего времени составило по метеостанции Анадырь около 2,0 °С, что превышает максимальное значение температуры конца 30-х годов и выше ее среднемноголетнего значения на 1,5 °С.

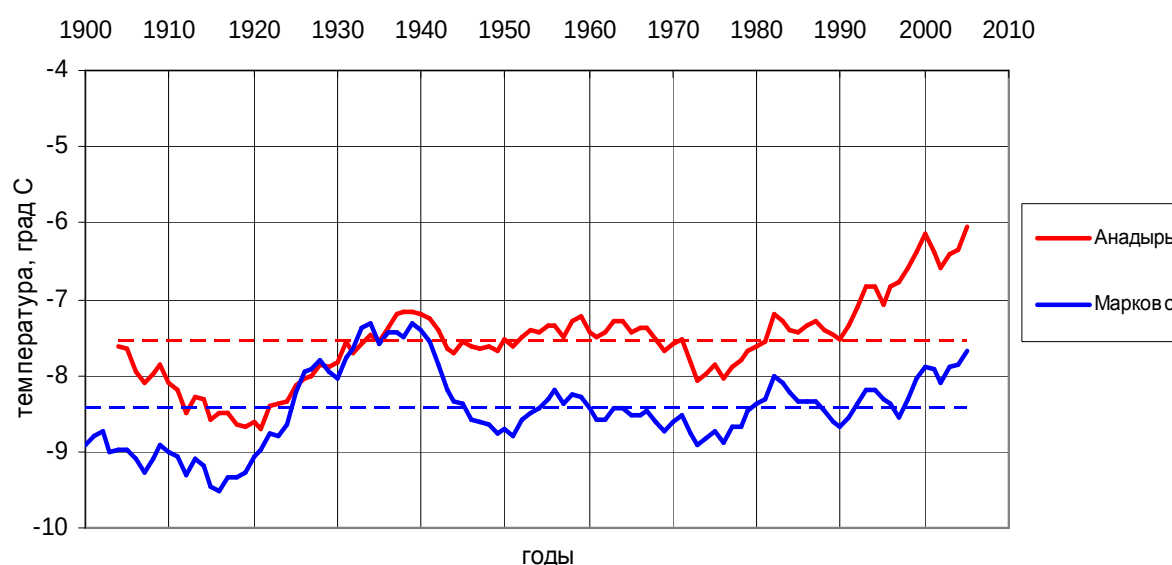


Рис. 2.5 Динамика 10-летних скользящих кривых температуры воздуха по метеостанциям Северо-Востока России

Несколько иная картина фиксируется по данным наблюдений на м.с. Марково. Современное потепление здесь выражено заметно слабее. Повышение значений среднегодовой температуры между последним минимумом и современными значениями не превышает 0,8 °С. Кроме того, в конце 40-х годов повышение температуры воздуха было значительно выше, чем в последние годы.

Таким образом, проведенный краткий анализ показывает существенное различие в закономерностях формирования динамики температурного режима воздуха в региональном плане за последние годы.

Анализу современных изменений климата посвящено большое количество работ. Это исследования Ю.А. Израэля и др., А.В. Павлова, О.А. Анисимова, Н.Б. Какунова, Н.Г. Обермана и др. Наиболее информативными в этом направлении представляются исследования, выполненные А.В. Павловым и др., (1997, 2001, 2003, 2005). Результаты этих исследова-

ний в виде мелкомасштабных карт севера России обобщены в монографии (Павлов, 2008) и в работе, посвященной современному изменению температурного режима грунтов на севере России (Павлов, Малкова, 2009).

2.2. Краткая характеристика геокриологических условий

2.2.1. Геокриологические условия территории Европейского Севера России

На территории Европейского Севера рассматривались три геокриологических региона: Мало-Большеземельский регион, территории полуострова Канин Нос и Южного острова архипелага Новая Земля. Характеристика геокриологических условий этих территорий дана по материалам монографии «Геокриология СССР. Европейская территория СССР», (1988).

По схеме геокриологического районирования большая часть территории Европейского Севера России относится к Мало-Большеземельскому региону.

Территория Мало-Большеземельского региона расположена на северо-востоке европейской территории СССР и в административном отношении находится в пределах Республики Коми и Ненецкого национального автономного округа Архангельской области. С севера территорию омывает Печорское море, с юга ограничивает широтное колено р. Печора, с запада — Тиманский кряж, с востока — Уральский хребет.

Регион представляет собой полого-холмистую равнину, опускающуюся на север серией морских террас; средние абсолютные отметки поверхности составляют 50-180 м. В центральной части территории прослеживается цепь гряд с абс. отм. до 200-240 м. В бассейне среднего течения р. Колва расположена обширная депрессия с отметками поверхности 90-100 м. В основном преобладают аккумулятивный ледово-морской, морской и озерно-аллювиальный типы рельефа; лишь в Приуралье развиты участки денудационной и денудационно-аккумулятивной равнины.

Для территории характерны значительные изменения геокриологических условий как в широтном, так и в меридиональном направлениях. Распространение и температура мерзлых и талых пород подчиняются широтной зональности. На фоне общей геокриологической зональности отмечаются региональные и локальные отклонения от нее, обусловленные воздействием комплекса региональных факторов.

В пределах региона выделяют подзоны сплошного, прерывистого, массивно-островного и островного (редкоостровного) распространения мерзлых пород (рис. 2.6).

родно-климатическим зонам. В северной части подзоны мерзлые породы залегают с поверхности на безлесных водораздельных пространствах и террасах рек; наиболее широко они развиты на участках распространения озерно-аллювиальных и озерно-болотных отложений — в крупных депрессиях рельефа, имеющих полигональный и плоско-бугристый рельеф (Среднеколвинская и Среднелайская впадины, Хорейверская депрессия). В южной части подзоны мерзлые породы занимают менее половины площади и приурочены к высоким надпойменным террасам рек без лесной растительности, бровкам водотоков, резко выступающим в рельефе, торфяным полям и заболоченным низинам с бугристым и плоскобугристым микрорельефом, плоским водораздельным участкам с блочным микрорельефом и низкорослой кустарниковой растительностью.

Формирующие величину среднегодовой температуры пород на глубине годовых теплооборотов (T_0) природные факторы в различных геокриологических подзонах обуславливают ее изменение в диапазоне от -5 на севере до $+3$ $^{\circ}\text{C}$ на юге.

В подзоне прерывистого распространения мерзлых толщ их среднегодовая температура изменяется от 0 до -2 $^{\circ}\text{C}$, достигая в некоторых случаях $-2,5$, $-3,0$ $^{\circ}\text{C}$; температура талых пород изменяется от 0 до $0,5$ $^{\circ}\text{C}$, реже до $1,0$ $^{\circ}\text{C}$. Наиболее низкая температура (от -2 до $-2,5$) отмечена в пределах крупных заболоченных, покрытых плоскими и полигональными торфяниками низин на озерно-аллювиальной равнине междуречий Колва-Харьяха, Колва-Сандивей.

В центральной и южной частях подзоны в пределах среднеплейстоценовых равнин с блочным микрорельефом горные породы имеют температуру от $-1,0$ до $-2,0$ $^{\circ}\text{C}$. Достаточно низкие температуры обусловлены увеличением по сравнению с предыдущей подзоной охлаждающего влияния растительности, мощного мохового покрова и торфа. В узких полосах стока, межбугровых и межблочных понижениях, а также на пологих склонах с ивняково-ерниковой растительностью температура горных пород достигает $0,5 - -1$ $^{\circ}\text{C}$, иногда выше, за счет увеличения тепляющего влияния снежного покрова. В средних и крупных полосах стока и понижениях мощность снега составляет $0,8-1$ м, а температура горных пород на таких участках от 0 до $-0,5$ $^{\circ}\text{C}$. Здесь часто формируются несквозные талики мощностью $5-10$ м. На поймах и под руслами мелких и средних рек и ручьев, на низких речных террасах, под днищами озер, в пределах крупных низин и полос стока, поросших густой кустарниковой растительностью, особенно в южной части подзоны, существуют талики с температурой пород от 0 до $0,5$ $^{\circ}\text{C}$. В оторфованных понижениях и торфяных болотах температура талых пород близка к нулю. В долинах рек Куя, Шапкина, Колва, Уса температура повышается до 1 $^{\circ}\text{C}$. Повышение температуры талых пород отмечается также вдоль левого берега р. Харьяха, где на протяжении 50 км от ее устья на северо-восток проходит неотектонический разлом. На лай-

дах и низких морских террасах в Малоземельской тундре, где широко развиты криопэги, температура многолетнемерзлых и охлажденных пород изменяется от 0 до -2°C , талых — от 0 до $-0,5^{\circ}\text{C}$.

В подзоне массивно-островного распространения мерзлых пород их температура изменяется преимущественно от 0 до -1°C , реже до $-1,5^{\circ}\text{C}$. Температура до $-1,5^{\circ}\text{C}$ отмечена на плоскобугристых торфяниках в пределах озерно-аллювиальной равнины на правом берегу р. Колва. На формирование и пространственную изменчивость среднегодовой температуры горных пород, так же как и в предыдущей подзоне, большое влияние оказывают снежный и растительный покровы, состав пород и их свойства. Так, на поверхности торфяников температурный режим определяется отепляющим влиянием снега, составляющим $3,5-4,5^{\circ}\text{C}$, охлаждающим действием растительности, достигающим $0,8^{\circ}\text{C}$, а на глубине сезонного оттаивания T_0 пород понижается по сравнению с T_0 на почве на $2-3^{\circ}\text{C}$ из-за значительного изменения коэффициента теплопроводности пород сезонного слоя при изменении их теплового состояния. На возвышенных водораздельных пространствах, высоких террасах рек, грядах холмов, имеющих песчано-суглинистый состав, под иным по значимости влиянием тех же факторов T_0 пород изменяется от $-0,8$ до $-1,2^{\circ}\text{C}$. Еще более высокие температуры от $-0,5$ до $-0,8^{\circ}\text{C}$ характерны для открытых тундровых участков низких террас, плоских междуречных равнин с редколесьями и хорошо выраженным кочковатым типом микрорельефа.

Зональность природной обстановки определила характерные изменения инженерно-геокриологических условий в широтном направлении: уменьшение с севера на юг площади распространения многолетнемерзлых пород и мощности от нескольких сотен метров до 5-10 м близ границы криолитозоны.

Региональные факторы нарушают зональность инженерно-геологических условий, наиболее существенно в подзонах несплошного распространения мерзлых толщ горных пород. На севере области, где мощность многолетнемерзлых пород достигает 400 м, их возраст плейстоценово (нижняя часть разреза)-голоценовый (верхняя часть разреза). Близ побережья под толщей мерзлых пород залегают породы с криопэгами мощностью до 100-200 м. В наиболее благоприятных для сохранения от протаивания реликтовых многолетнемерзлых пород (ММП) встречаются участки двухслойных и глубокозалегающих мерзлых толщ.

В регионе широко развиты криогенные процессы, криогенные и посткриогенные образования. Наиболее распространены различные по форме и размерам бугры пучения, образовавшиеся в результате многолетнего или сезонного промерзания горных пород, термокарстовые и термоэрозионные формы рельефа, сформировавшиеся при многолетнем протаивании льдистых отложений, полигональный микрорельеф и связанные с ним полигонально-жильные льды.

В результате термокарстового процесса образуются озера, западины, блюдца и другие отрицательные формы рельефа. Наиболее крупные из них — термокарстовые озера — формируются в пределах торфяников. Их размеры в поперечнике изменяются от десятков метров до 1 км и более. Глубина озер обычно не превышает 2 м. Существуют также древние термокарстовые котловины, образовавшиеся после спуска озер. Наиболее широко они представлены в Среднеколвинской впадине, Хорейверской депрессии.

В минеральных грунтах термокарстовые формы рельефа распространены менее широко. В основном они представлены древними формами на участках бугристо-западинного микрорельефа в центральной и северной частях региона. На низких морских террасах возможны современные термокарстовые процессы в минеральных грунтах, имеющих высокую льдистость.

Процессы термоэрозии развиты ограниченно и приурочены в основном к речным долинам. Термоэрозионные формы представляют собой овраги различной конфигурации, обычно с крутыми склонами. Наиболее интенсивно процесс термоэрозии проходит на склоновых участках, сложенных мерзлыми сильнольдистыми аллювиальными и озерно-аллювиальными породами, но обязательно при наличии бассейнов стока.

Морозобойное растрескивание и формирование повторно-жильных льдов происходит в суглинках, глинах и торфе. Причем в южной части территории морозобойному растрескиванию подвергаются только торфяники; с продвижением на север — глины и суглинки. Однако одновременное формирование жильных льдов и накопление осадков происходит лишь в торфах. Существование погребенных повторно-жильных льдов также подчиняется широтной зональности: в южной части территории распространения повторно-жильных льдов ледяные жилы развиты только в торфах; с продвижением на север они начинают встречаться в глинах и суглинках, а на крайнем севере, приблизительно с широты р. Ярея — в песках.

Полуостров Канин расположен в Архангельской области и отделяет северную часть Белого моря от мелководной Чешской губы Баренцева моря. Площадь около 10,5 тыс. км². В расширенной северной части полуострова располагается платообразный кряж — Канин Камень (высота до 242 м), сложенный кристаллическими сланцами; на северо-западе заканчивается скалистым мысом Канин Нос, на юго-востоке — Микулькиным мысом.

Остальная часть Каниного полуострова — однообразная, плоская, низменная и заболоченная тундровая равнина, сложенная перемытыми ледниковыми и морскими отложениями с отдельными моренными холмами высотой 70-80 м. Для области в целом характерна малая мощность рыхлых мезо-кайнозойских и четвертичных отложений. В пределах хребтов скальные породы выходят на дневную поверхность, в равнинной части — зале-

гают на глубинах от первых метров до первых десятков метров. Четвертичные отложения представлены преимущественно верхнеплейстоценовыми морскими, ледово-морскими и лагунно-морскими осадками, перекрытыми, на большей части территории области озерно-болотными образованиями.

Полуостров Канин расположен в зоне преимущественного распространения ММП. На юге острова мерзлые породы встречены вдоль 66° с. ш., в верховьях рек Ома, Чеша и Пеша. Отчетливо проявляется и увеличение площадей распространения мерзлых пород с запада на восток. Например, к западу от Мезенской губы на широте Полярного круга мерзлые породы встречены лишь на небольших по площади участках в окрестностях с. Койда. Восточнее, вдоль южного побережья Чешской губы, на этой широте расположены крупные мерзлые торфяные массивы, составляющие до 20-25 % площади слаборасчлененных заболоченных междуречий.

Среднегодовая температура горных пород в пределах региона в целом изменяются от -3 до +4 °С. Наиболее низкие их значения формируются в северной, возвышенной части п-ова Канин. Большая часть мерзлых пород имеет среднегодовые температуры до -1,0 °С. Максимальные положительные значения температур пород зафиксированы на песчаных террасах рек Пинега, Пеза, Мезень, Ома и др. На слаборасчлененных, заболоченных междуречных пространствах температуры талых пород не превышают + 2 °С.

Для многолетнемерзлых пород области в целом характерны относительно небольшие мощности. Их максимальные значения (порядка 70-75 м) отмечены на севере п-ова Канин. На равнинных пространствах междуречий и речных террас их мощность составляет от 20 до 30 м, а южнее Полярного круга — не более 15 м. К западу от г. Мезень на небольших по площади островах мерзлых пород глубина многолетнего промерзания не превышает 5-7 м.

Вследствие морского климата и достаточно высокой влажности верхних горизонтов горных пород в пределах области преобладают сравнительно небольшие глубины сезонного промерзания и сезонного оттаивания дисперсных пород. Как правило, глубины сезонного оттаивания на торфах не превышают 0,8 м, в супесчано-суглинистых породах — 1,3 и в песчаных породах — 1,7 м; глубины сезонного промерзания на торфах — до 1,0 на супесчано-суглинистых породах — до 1,7 и на песках — до 2,7 м.

Вдоль побережий Белого и Баренцева морей широко развиты процессы термоабразии. Наибольшая интенсивность этих процессов отмечена на западном и восточном побережьях п-ова Канин, где высота уступов, сложенных мерзлыми породами, на морских побережьях достигает 10-20 м на протяжении десятков километров, а высота прилива составляет 4- 4,5 м. Здесь же на участках, прилегающих к морским побережьям, наиболее развиты процессы термоэрозии.

Термокарстовые процессы широко развиты на южном побережье Чешской губы, на низких морских террасах и слабо расчлененных водораздельных пространствах рек Пеша, Ома, Вижасы, а также в центральных, плоских частях п-ова Канин. Размеры термокарстовых озер в поперечнике редко превышают 1 км, что связано, очевидно, со сравнительно небольшой мощностью толщи дисперсных отложений.

Процессы пучения ярче всего проявляются в тех районах, где широко развит термокарст. В северной части области процессы пучения проявляются в образовании многолетних бугров пучения, в приполярных районах — в образовании однолетних, реже многолетних бугров пучения. Высота многолетних бугров не превышает 3-4 м, в ядре их, судя по исследованиям в бассейнах рек Шойна и Ома, преобладает ледогрунт с объемной льдистостью 70-80 %.

Полигональные формы рельефа, связанные с морозобойным растрескиванием пород, развиты в северных и самых южных районах области. На севере, на морских террасах п-ова Канин и реже на побережье Чешской губы, — это полигональные и полигонально-валиковые тундры, а в южной части области — обширные участки развития бугристо-западинного рельефа.

Южный остров архипелага Новая Земля. Остров Южный с севера ограничен проливом Маточкин Шар, с юга — проливом Карские ворота, с запада омывается водами Баренцева, с востока — Карского моря. В административном отношении остров относится к Архангельской области Российской Федерации.

Остров характеризуется разнообразием типов и форм рельефа. В северной его части, севернее широты залива Брандта, располагается массив средневысотных гор альпинотипного облика с преобладающими абсолютными высотами 900-1000 м, максимальные высоты достигают 1220-1292 м, относительные превышения составляют 500-800 м.

К югу от широты рек Домашняя — Перевальная горы постепенно переходят в платообразную поверхность. С юга, запада и востока оно охватывает горную часть острова, представляя собой по сути предгорья. Плато характеризуется относительно слабо расчлененным рельефом с абсолютными высотами 200-400 м, максимальные отметки 519-527 м. Относительные высоты обычно не превышают 100 м, в отдельных местах достигая 150-200 м.

Равнина с абсолютными высотами от 0 до 200 м занимает южную часть острова. Рельеф равнины грядово-увалистый. Гряды высотой до 60-80 м, нередко куэстообразной формы, с узкими водоразделами и крутыми ступенчатыми склонами. На некоторых участках равнины сохранились аккумулятивные формы рельефа: останцы береговых валов, баров и кос, сложенных песчано-гравийным материалом. Равнина заболочена с множеством мелких и крупных озер и мерзлотными формами микрорельефа — бу-

грами пучения, термокарстовыми просадками, пятнами-медальонами, каменными многоугольниками и прочее. Ледники имеются только в северной части острова. В основном ледники каровые (присклоновые) и долинные.

Южный остров, согласно схеме геокриологического районирования криолитозоны (*Геокриология СССР. Европейская территория СССР, 1988*), входит в северную область распространения многолетнемерзлых пород и характеризуется сплошным по площади и непрерывным по разрезу распространением многолетнемерзлых пород мощностью от 150-200 до 500-600 м и более. При этом в толще многолетнемерзлых пород возможно существование сквозных и несквозных таликовых окон под озерами и руслами крупных рек, а также приуроченных к техногенным чашам протавания на застроенных территориях.

В строении современной криолитозоны участвуют несколько криогенных ярусов пород. Верхний из них – это собственно мерзлые породы, содержащие текстурообразующий лед и ледяные прослойки, залегающие с поверхности и распространенные повсеместно. Мощность их определяется мощностью льдистых рыхлых отложений и выветрелых скальных пород со льдом в трещинах и изменяется от первых метров на положительных элементах рельефа до 70 и более метров в днищах крупных речных долин (*Кондратьева, 1979, Кондратьева, Пармузин, Петрожицкий, 1996*).

Среднегодовые температуры многолетнемерзлых пород на глубине нулевых годовых амплитуд составляют от $-1,5^{\circ}$ до $-4,5^{\circ}\text{C}$ на отрицательных формах рельефа и до $-6,0^{\circ}\text{C}$ на положительных. Минимальные среднегодовые температуры (до $-5,5..-6,0^{\circ}\text{C}$) характерны для выпуклых водораздельных участков с абсолютными высотами до 100 м и более, где мощность снежного покрова не превышает 0,2-0,3 м, либо он вообще отсутствует, сдуваемый сильными ветрами. Для ровных поверхностей со снежным покровом мощностью 0,5-1,0 м типичные среднегодовые температуры пород составляют $-3,0 - -3,5^{\circ}\text{C}$. Максимальные среднегодовые температуры характерны для долин рек, ручьев и логов, имеющих субмеридиональное направление, где в зимнее время скапливается снег мощностью до 2,0-3,0 м и более.

На рассматриваемой территории господствующими являются криогенные процессы, то есть процессы, связанные с промерзанием и протаванием грунтов: морозное выветривание, солифлюкция, пучение и морозобойное растрескивание грунтов, термокарст, заболачивание и другие. Наблюдается также другие геологические процессы: абразия (разрушение морских берегов), речная эрозия (донная и боковая), аккумуляция морских и речных отложений. Большую роль в переформировании рельефа играют инженерно-геологические процессы – это процессы, вызванные инженерной и хозяйственной деятельностью человека. На Новой Земле они стано-

влятся мощным геологическим фактором. Особо существенные изменения геологической среды происходили в результате ядерных испытаний.

Общий характер распространения фоновой среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород для данного региона отображен на «Схеме районирования территории Европейского Севера России по репрезентативным значениям среднегодовой температуры многолетнемерзлых горных пород» (рис. 2.7).

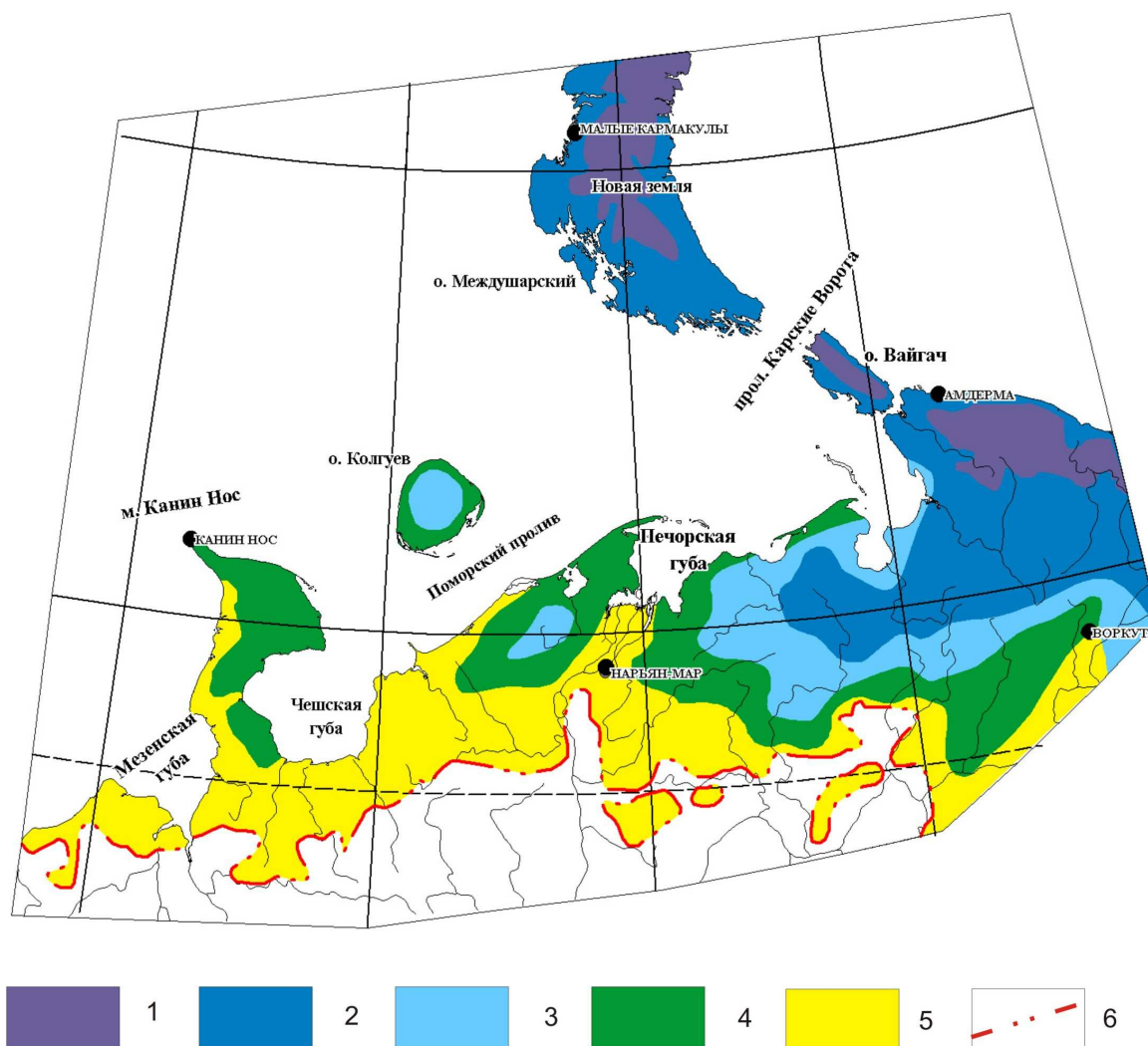


Рис. 2.7 Схема районирования Европейского Севера России по репрезентативным значениям среднегодовой температуры многолетнемерзлых горных пород (составлена А.А. Поповой с использованием Геокриологической карты СССР масштаба 1:25 000 000, 1991 г).
Интервалы среднегодовой температуры, $^{\circ}\text{C}$:
1 – от -5 до -7; 2 – от -3 до -5; 3 – от 0,5 до -3; 4 – от 0,5 до -2;
5 – от 2 до -1; 6 – южная граница распространения многолетнемерзлых пород

Для составления представленной схемы районирования была использована «Геокриологическая карта СССР» масштаба 1:2 500 000 (*Геокриологическая карта...*, 1991, *Геокриология СССР. Европейская территория СССР*, 1988).

2.2.2. Геокриологические условия территории Западной Сибири

Характеристика геокриологических условий этой территории дана по материалам монографии «Геокриология СССР. Западная Сибирь», (1989).

Исключительная равнинность рельефа Западной Сибири обусловила классическое проявление широтной зональности природно-климатических и геокриологических условий. С севера на юг сокращается площадь, занятая многолетнемерзлыми породами (с поверхности), повышается их температура (в однотипных условиях теплообмена), увеличиваются глубина сезонного протаивания и прерывистость мерзлой толщи в разрезе, уменьшается количество макроледяных включений, изменяются парагенетические комплексы экзогенных процессов.

Влияние метеорологических факторов приводит к существованию зональности в распределении среднегодовой температуры мерзлых толщ, активно выраженной на территории криолитозоны Западной Сибири. В рассматриваемом регионе среднегодовая температура многолетнемерзлых пород изменяется от 0...-0,5 °С на южной границе криолитозоны (среднетаежная зона) до -10...-11 °С на побережье арктических морей и островах (зона арктической тундры). На большей части территории Ямала, Гыдана и севере Тазовского полуострова температура пород ниже -5 °С. На юге Ямала, Гыдана, средней и южной части Тазовского полуострова в северных районах Надым-Пуровского, Пур-Тазовского и Таз-Енисейского междуречий температура пород в основном изменяется в пределах -2...-5 °С. Горизонтальный градиент понижения температуры пород с севера на юг в лесотундре и северной тайге близок к 1 °С/100 км. Общий характер распространения фоновой среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород для данного региона отображен на «Схеме районирования севера Западной Сибири по репрезентативным значениям среднегодовой температуры многолетнемерзлых горных пород» (рис. 2.8). Основой для ее составления послужила «Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000» (1991).

Южная граница распространения многолетнемерзлых пород (ММП) с поверхности примерно соответствует среднегодовой температуре воздуха -3 °С на западе и -4 °С на востоке. Разница между температурой поверхности грунта и температурой воздуха, обусловленная в основном отопляющим влиянием снежного покрова в зоне тундры не превышает 3 °С и возрастает до 4 -6 °С в лесотундровой и таежной зонах.

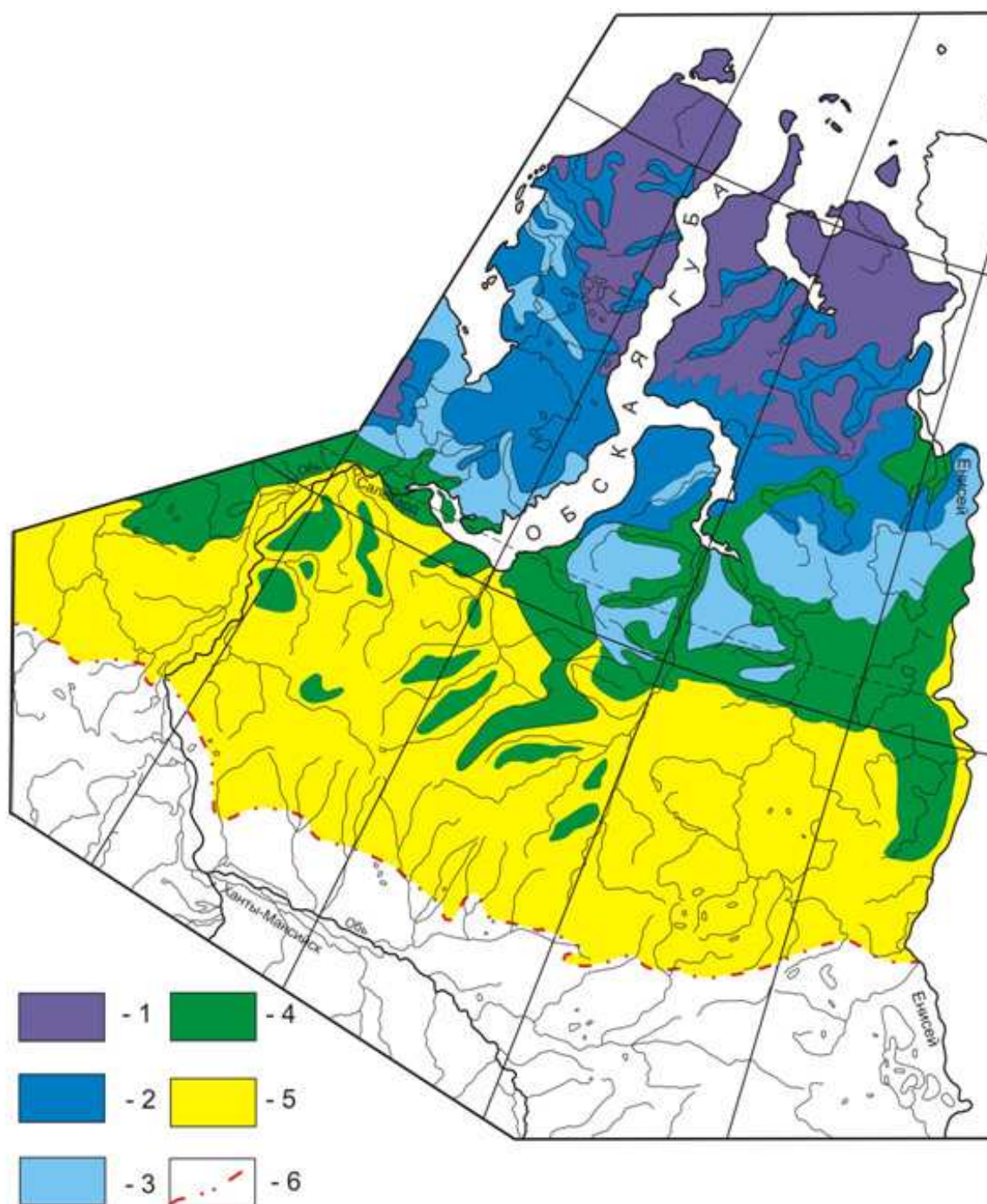


Рис. 2.8 Схема районирования севера Западной Сибири по репрезентативным значениям среднегодовой температуры многолетнемерзлых горных пород (составлена с использованием Геокриологической карты СССР масштаба 1:25 000 000, 1991 г).

Интервалы среднегодовой температуры, $^{\circ}\text{C}$:

- 1 – от -7 до -9; 2 – от -5 до -7; 3 – от -3 до -5; 4 – от -1 до -3;
 5 – от 2 до -1; 6 – южная граница распространения многолетнемерзлых пород

На фоне зональной изменчивости среднегодовой температуры верхних горизонтов многолетнемерзлых пород проявляются местные и локальные закономерности, связанные с ландшафтным строением территории и литологическим составом поверхностных отложений. В соответствии с особенностями ландшафтного строения территории наибольшая пространственная изменчивость температурного поля верхних горизонтов мерзлых пород свойственна эрозионным (холмистым и холмисто-увалистым) типам местностей. Наоборот, наибольшая однородность температур характерна для плоских участков речных и морских террас (плосколожбинные и озерно-болотные типы местностей).

В зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, в целом совпадающей с зоной тундры, ведущая роль принадлежит зимним факторам внешнего теплообмена, поэтому вариации температуры здесь определяются в первую очередь режимом снегонакопления, зависящего от степени и характера эрозионного расчленения рельефа. В глубоких понижениях рельефа (лога, овраги, узкие долины малых рек, прибортовые части озерных котловин и хасыреев) скапливаются большие массы снега.

Близкая к 0 °С температура мерзлых пород отмечается в пределах узких и глубоких логов с временными водотоками и четко видной системой дренажа в южной части Западного Ямала (вплоть до долины р. Се-Яха) и в его восточной части (Новопортовское месторождение). Мощные скопления снега отмечаются на закустаренных участках пойм и бортовых склонов рек и озер, где температура повышается по сравнению с водоразделами. Лесотундровая растительность (высокие кустарники) также является накопителем снега. В речных долинах, на широких полосах стока, повышение температуры пород может быть обусловлено непосредственно отопляющим влиянием водотоков; роль такого отопления возрастает, особенно в южных районах, для хорошо фильтрующих отложений. Высокая температура (от 0 до -2 °С) даже для условий мохово-лишайниковой тундры характерна для вновь образуемых мерзлых пород в днищах хасыреев. В южных районах криолитозоны Западной Сибири, где распространение многолетнемерзлых пород приобретает островной характер, ведущая роль в формировании температуры пород переходит к летним факторам внешнего теплообмена. В связи с этим становится ощутимым влияние северо-таежного растительного покрова (сомкнутость крон, высота деревьев и др.).

В самой северной части Западно-Сибирской низменности, на водораздельных участках со сдуваемым снежным покровом отмечаются самые низкие для региона среднегодовые температуры пород вне зависимости от литологического состава поверхностных отложений и различия в растительных ассоциациях. На севере Ямала, Гыдана, островах Карского моря (Вилькицкого, Белый и др.) среднегодовая температура многолетнемерз-

лых пород в плакорных условиях достигает $-9...-10^{\circ}\text{C}$, в понижениях, полосах стока она повышается до $-6...-7^{\circ}\text{C}$.

В подзоне средней тундры основной диапазон значений температуры на плакорных участках (фоновые значения) составляет $-6...-8^{\circ}\text{C}$. Здесь развит невысокий мохово-лишайниковый покров, почти не препятствующий выдуванию снега. В поймах крупных рек (Юрибей, Мордыяха, Се-Яха и др.), днищах озерных котловин и плоскодонных хасыреев температура обычно повышается на $1,5 - 2^{\circ}\text{C}$ по сравнению с прилегающими участками морских равнин (*Геокриология СССР. Западная Сибирь*, 1989). На отдельных пониженных участках местности с высоким кустарником и мощными снежными надувами температура ММП может повышаться до $-1...-2$ градусов.

В южной тундре и лесотундре фоновые значения температуры составляют $-2...-6^{\circ}\text{C}$. Относительно высокие значения температуры ($-2...-4^{\circ}\text{C}$) сформировались в поймах рек, полосах стока и на лайдах Байдарацкой, Обской и Тазовских губ. В песчаных пойменных отложениях (реки Щучья, Большая Хета, Пур и др.) температура повышается до $-1...-5^{\circ}\text{C}$. В понижениях со значительными снегонакоплениями температуры могут принимать близкие к 0°C значения и кровля ММП зачастую оказывается пониженной на 5-10 м.

В северо-таежной зоне, охватывающей зону массивно-островного и островного распространения ММП, вследствие сложного ландшафтного строения территории, отмечаются наиболее существенные пространственные вариации теплового поля верхних горизонтов пород. Наиболее низкие значения температуры ($-2...-4^{\circ}\text{C}$) наблюдаются на участках обширных торфяников, а также буграх пучения. В понижениях рельефа, полосах стока, в пределах пойм температура повышается до $0 - +1,5^{\circ}\text{C}$. В поймах рек температура нередко ниже, чем на водоразделах, вследствие высокой сомкнутости крон деревьев.

В области прерывистого распространения ММП широко распространены радиационно-тепловые талики. Они приурочены к залесенным участкам речных террас и водоразделов, сложенных хорошо фильтрующими песками (плосколожбинные и холмистые типы местностей). Мощность этих таликов в южно-лесотундровой ландшафтной провинции изменяется от 3-4 до 8-10 м; в северо-таежной может превышать 20 м (*Геокриология СССР. Западная Сибирь*, 1989). Кровля многолетнемерзлых пород понижается в пределах заболоченных участков и болот. Гидрогенные талики развиты под руслами рек и озерами. Сквозные талики в южно-лесотундровой ландшафтной провинции формируются исключительно под руслами крупных рек (Обь, Енисей, Надым, Пур, Таз), а также под днищами наиболее крупных и глубоких мерзлотно-тектонических озер (*Геокриологические...*, 1983). Под большинством термокарстовых озер формируются несквозные талики мощностью до нескольких десятков метров.

Мощность многолетнемерзлых пород в пределах области их прерывистого распространения изменяется от 4-6 до 50-100 м на пойме крупных и средних рек и до 300-400 м в центральных частях междуречий. Незначительные мощности многолетнемерзлых пород (от нескольких метров до 10-20 м) отмечаются на участках близкого залегания подземных вод (пойма рек, днища хасыреев и т.д.), а также на участках современного новообразования мерзлых пород.

Южнее, в среднетаежной подзоне, распространены лишь реликтовые мерзлые толщи. Современные мерзлые толщи в естественных условиях при современной климатической обстановке здесь не встречаются (зона потенциального развития многолетнемерзлых пород по В.В. Баулину, 1985). Наибольшая вероятность формирования мерзлых толщ с поверхности существует при нарушении естественных условий в ходе хозяйственного освоения территории: изменении ландшафтных условий, снятии или нарушении растительного покрова, изменении режима снегонакопления.

2.2.3. Геокриологические условия территории Средней и Восточной Сибири

В административном отношении рассматриваемая территория относится к республике Саха-Якутия. Пространственная изменчивость среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород здесь чрезвычайно велика, что обусловлено широтной зональностью внешнего теплообмена, морфоструктурными особенностями (разнообразием равнин, плато, плоскогорий и горных систем), геолого-тектоническим строением Средней и Восточной Сибири, ландшафтно-климатическими условиями территории, расположенной в трех климатических поясах – арктическом, субарктическом и бореальном. Влияние всех этих факторов и условий на теплообмен в горных породах интегрально выражается в их среднегодовой температуре. Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород (T_0) в регионе изменяется от -11, -13 °С на арктических приморских низменностях до -0,5 °С на Лено-Вилуйско междуречье. Почти половина республики Саха-Якутия занята горными сооружениями с очень низкими T_0 от -9 до -5 °С (Верхоянский, Яно-Оймяконский, Черско-Момский и др.). Только на юге и частично на восточных окраинах республики в горных районах T_0 изменяется от -3 до -5 °С (например, в пределах Алданского нагорья).

Низкие значения T_0 (от -5 до -7 °С) характерны для равнин и плато в Прианабарском районе, на Аленик-Ленском междуречье, в Яно-Оймяконском и Яно-Колымском районах. В пределах Вилуйского плато преобладают T_0 от -3 до -5 °С. Наиболее высокие значения T_0 от -0,5 до -2 °С отмечаются для Лено-Вилуйского и Ангара-Ленского районов. Эти значения типичны также для долины р. Лена в ее среднем течении и для долины р. Алдан в его низовьях. На юго-восточной окраине Вилуйского

плато и на Приленском плато наиболее широко распространены многолетнемерзлые породы с T_0 от -1 до -3 °С.

Общий характер распространения фоновой среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород для данного региона отображен на «Схеме районирования территории Средней и Восточной Сибири по репрезентативным значениям среднегодовой температуры многолетнемерзлых горных пород» (рис. 2.9). Для ее составления была использована «Геокриологическая карта СССР» масштаба 1:2 500 000 (*Геокриологическая карта...*, 1991, *Геокриология СССР. Средняя Сибирь 1989, Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток, 1989*).

Из карты температурного районирования многолетнемерзлых горных пород видно, что лишь третья часть территории Средней и Восточной Сибири характеризуется относительно теплыми условиями, где среднегодовая температура многолетнемерзлых пород выше -3 °С. Очевидно, именно здесь возможны наиболее значительные изменения геокриологических условий под влиянием изменения климата.

Выводы

1. Для анализа современного состояния криолитозоны России и прогноза изменения температурного режима многолетнемерзлых пород в будущем проанализированы результаты метеонаблюдений за среднегодовой температурой воздуха более чем по 70 метеостанциям, расположенным в различных районах криолитозоны России и вне ее, вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород. Для районов Европейского Севера России, Западной, Средней и Восточной Сибири, Забайкалья и Амурской области анализировались данные с начала проведения наблюдений до 2009 г.

2. За период метеонаблюдений для районов Европейского Севера России и Западной Сибири начиная с середины-конца 60-х годов отмечается незначительное повышение значений среднегодовой температуры воздуха. Отмечающееся в последние годы потепление климата либо соответствует максимуму 30-40-х годов, либо незначительно его превышает.

3. На территории Средней и Восточной Сибири динамика среднегодовой температуры воздуха по результатам наблюдений существенно отличается от Европейского Севера и Западной Сибири. По данным метеостанций Якутск и Верхоянск с начала-середины 60-х годов отмечается достаточно резкое повышение среднегодовой температуры воздуха. Причем максимум повышения температуры воздуха, который отмечается в настоящее время, значительно превышает те значения, которые были зафиксированы в период 30-40-х годов прошлого века и, кроме того, превышает среднемноголетнее значение среднегодовой температуры воздуха за весь период наблюдений.

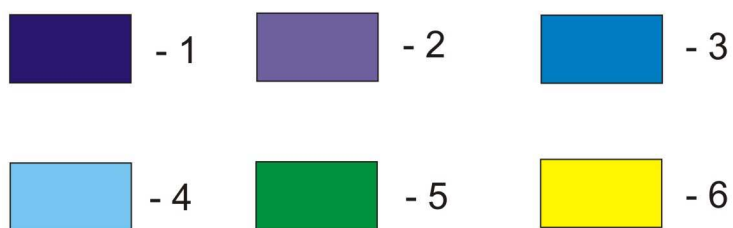
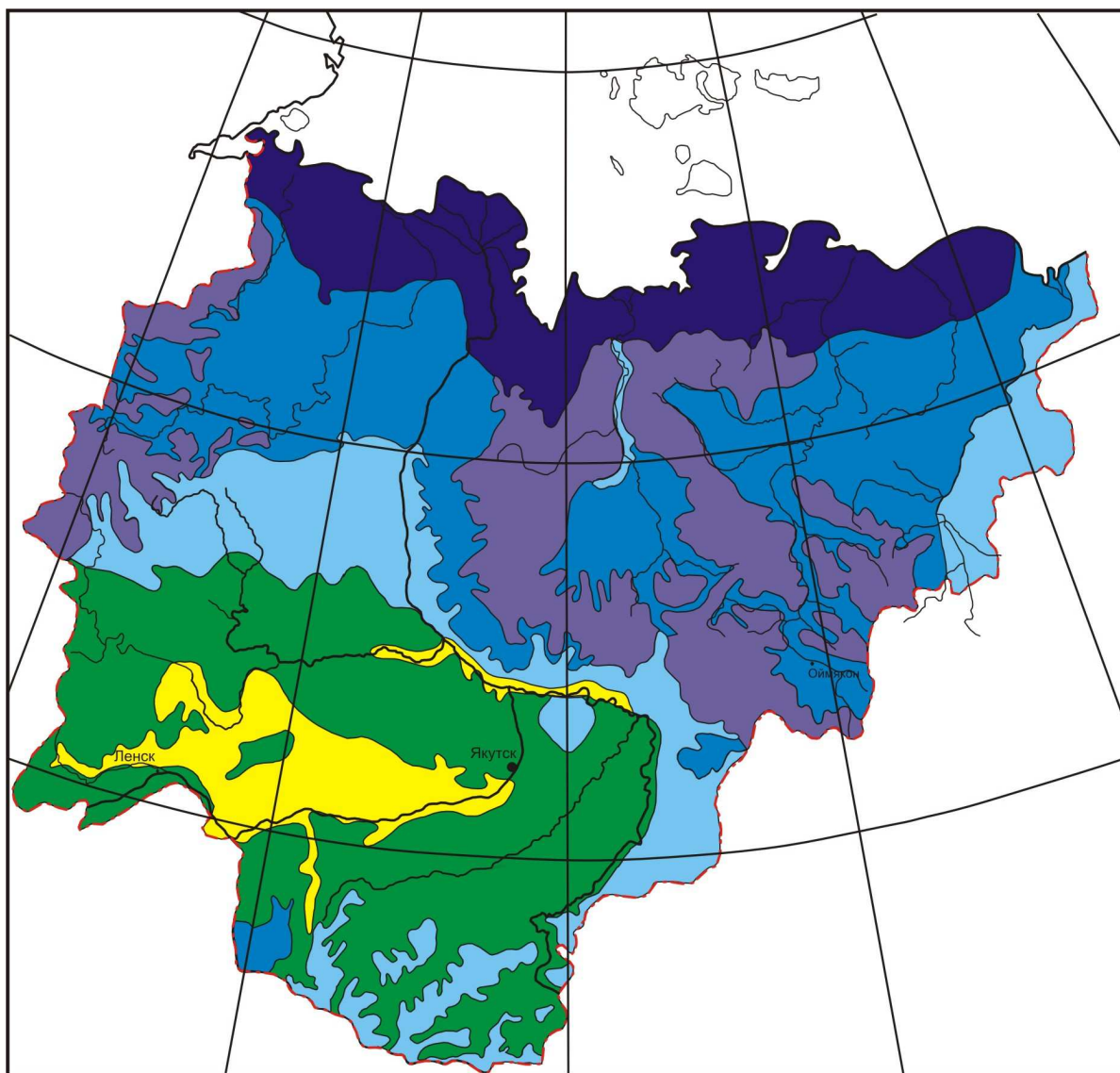


Рис. 2.9 Схема районирования территории Средней и Восточной Сибири по репрезентативным значениям среднегодовой температуры многолетнемерзлых горных пород (составлена с использованием Геокриологической карты СССР масштаба 1:25 000 000, 1991 г).

Интервалы среднегодовой температуры, $^{\circ}\text{C}$: 1 – от -9 до -13;
 2 – от -7 до -9; 3 – от -5 до -7; 4 – от -3 до -5; 5 – от -1 до -3;
 6 – от -0,5 до -2

4. В чем-то сходные закономерности динамики температурного режима воздуха проявляются и для районов Забайкалья и Амурской области. С середины 70-х годов начинается резкое повышение среднегодовой температуры воздуха, которое продолжается и до настоящего времени. Среднегодовая температура воздуха за этот период повысилась примерно на 2,2 градуса по сравнению с периодом середины 70-х годов.

5. Температурный режим воздуха на территории Северо-Востока России охарактеризован по данным метеостанций Анадырь (с 1899 г.) и Марково (с 1895 г.). Повышение значений среднегодовой температуры воздуха за период с 70-х годов до настоящего времени составило по метеостанции Анадырь около 2,0 градусов, что превышает максимальное значение температуры воздуха конца 30-х годов и выше ее среднемноголетнего значения (за весь период наблюдений) на 1,5 градуса. Несколько иная картина фиксируется по данным наблюдений на метеостанции Марково. Современное потепление здесь выражено заметно слабее. Повышение среднегодовой температуры между последним минимумом и современными значениями не превышает 0,8 градуса. Кроме того, в конце 40-х годов повышение температуры воздуха было значительно выше, чем в последние годы.

Глава 3

Ретроспективный анализ данных многолетних наблюдений за температурой воздуха

3.1. Методика обработки данных многолетних наблюдений.

По данным метеорологических наблюдений установлено, что с середины 60-х годов XX столетия на планете происходит устойчивое повышение средней годовой температуры воздуха. Это потепление можно объяснить естественно – исторической динамикой климата, связанной с общепланетарными геофизическими причинами, и влиянием на климат хозяйственной деятельности человека (антропогенного фактора), обусловленным выбросом в атмосферу углекислого газа, метана, закиси азота и других газов, создающих парниковый эффект. Считается, что антропогенное влияние на температуру воздуха стало практически заметным, начиная с 1970 г. Ожидается, что к середине XXI столетия оно вызовет повышение средней годовой температуры воздуха, которое составит от 1,5 до 7,0 °С, при этом антропогенный рост температуры будет происходить по линейному закону (*Борзенкова и др., 1987; Борисенков, 1990; Haigh, Pyle, 1982; Lacis et. al., 1981; Manabi, Wetherald, 1980*).

В настоящее время существует много теоретических сценариев глобального потепления. Однако их общим недостатком является слабая корреляция с данными наблюдений за период после 1970 г. По нашему мнению, более точную информацию о повышении температуры воздуха следует получать непосредственно из температурных наблюдений путем сопоставления метеорологических рядов до 1970 г. с рядами после 1970 г. Методика такого анализа среднегодовой температуры воздуха была разработана на кафедре геофизиологии МГУ в 2000 г. (*Хрусталева, Медведев, Пустовойт, 2000*) и названа авторами методикой авторетроспективного анализа. Она основывается на двух важных допущениях, принятых на основе изучения вышеназванной литературы:

1. Естественно – исторические изменения температуры воздуха являются периодическими, обусловленными суммой гармонических колебаний с различной амплитудой, периодом и фазой, которые неизменны как в период наблюдений, так и в период прогноза (в период прогноза вновь ничего не происходит).
2. Антропогенное повышение средней годовой температуры подчиняется линейному закону и отмечается не ранее 1970 г.

Итак считается, что до 1970 г изменения среднегодовой температуры воздуха были обусловлены известными природными циклами, а позже, причем точно неизвестно, когда именно, к природным циклам прибавился антропогенный фактор, обусловивший линейный тренд температуры. Ин-

тервал времени от начала наблюдений до 1970 г. считается базовым, после – текущим.

Периодические колебания температуры воздуха на базовом промежутке времени аппроксимируются тригонометрическим рядом Фурье вида:

$$T(t) = T_{cp} + \sum_{j=1}^N A_j \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{y_j} \cdot t + \varphi_j\right), \quad (3.1)$$

где t – время в календарных годах (например, 1951); T_{cp} – средняя многолетняя температура на базовом интервале, $^{\circ}\text{C}$; A_j – амплитуды гармоник, $^{\circ}\text{C}$; φ_j – фазы гармоник, рад; y_j – периоды, лет, N – количество гармоник.

При этом число гармоник ряда и их параметры A_j , φ_j подбираются таким образом, чтобы они с одной стороны, соответствовали известным природным циклам, а с другой – обеспечивали заданную точность разложения. Обычно выделяют короткопериодные (2-8 лет, 17-22 года, 35-40 лет), вековые (80-100 лет) и двух – трехвековые (210-308 лет) климатические ритмы (Гриб, Поляк, 1976; Дроздов, Григорьева, 1989; Дроздов., 1989; Максимова, 1983; Полозова, 1970).

Точность разложения определяется по остатку между фактическими значениями температуры воздуха и ее гармоническим разложением. Этот ряд мы называем рядом флуктуаций η . Флуктуации η должны представлять собой последовательность некоррелированных случайных величин с конечной дисперсией σ_{η}^2 и подчиняться нормальному закону распределения (белый шум). Если они не являются белым шумом, то в составе ряда присутствует неучтенная аппроксимирующей формулой периодическая составляющая, которая должна быть выявлена и добавлена в формулу.

Считается, что полученное разложение аппроксимирует природные колебания температуры на всем интервале времени (базовом и текущем). Однако на текущем интервале к ним добавляется еще и линейная составляющая g – антропогенный тренд.

Для выявления тренда текущий интервал разбивается на отрезки времени, определяющие частные выборки температуры. Эти выборки, с одной стороны должны быть достаточно большими (представительными) для оценки генеральной совокупности, а с другой – достаточно короткими для оценки момента начала антропогенного повышения температуры. Этим условиям отвечают выборки объемом $n = 7$ лет (скользящие семилетия). Для каждой частной выборки определяется ряд флуктуаций (остаток между фактическими значениями температуры воздуха на конкретном семилетнем интервале разбиения и ее гармоническим разложением, найденном на базовом интервале), который статистически сравнивается с рядом флуктуаций на базовом интервале. Если ряды относятся к одной генеральной совокупности, то считается, что в текущем семилетии происходят только природные изменения температуры, а антропогенный тренд отсут-

ствуется. В противном случае первый год семилетия принимается за начало антропогенного тренда (рубежный год). Величина тренда определяются подбором, исходя из условия, чтобы ряды флуктуаций на семилетнем и базовом интервале были статистически равны между собой, т.е. должны быть статистически равны между собой средние значения рядов и их дисперсии. Проверка нулевой гипотезы о равенстве средних осуществляется по критерию Стьюдента, о равенстве дисперсий – по критерию χ^2 . Для каждой семилетней выборки рассчитываются две величины:

$$S = (\eta - \eta_0) (n/D)^{1/2}, \quad H = (n-1) D/D_0, \quad (3.2)$$

где η – среднее по выборке, D – выборочная дисперсия, n – объем выборки; η_0, D_0 – среднее значение и дисперсия базового ряда.

Случайные величины S и H имеют, соответственно, распределения Стьюдента и χ^2 с числом степеней свободы $n-1$ и уровнем значимости α . При проверке гипотезы о равенстве средних значений ($\eta = \eta_0$) альтернативная гипотеза состоит в том, что $\eta > \eta_0$ (ищем тренд повышения температуры), и значит, критическая область является односторонней; для дисперсий альтернативная гипотеза: $D \neq D_0$, то есть критическая область двусторонняя. Отсюда следует, что нулевая гипотеза принимается, если выполняются неравенства:

$$S < S_u; \quad H_{u1} < H < H_{u2}, \quad (3.3)$$

где S_u, H_{u1}, H_{u2} – квантили распределения, соответственно, Стьюдента и χ^2 , зависящие от числа степеней свободы и принятого уровня значимости, назначаются по данным математических справочников.

В результате получаем прогнозную формулу (3.4), состоящую из суммы периодических составляющих, моделирующих естественный ход температуры воздуха, одной линейной составляющей (тренда), моделирующей антропогенные изменения температуры воздуха после рубежного года t_p , а также некоторой поправки $t_\alpha \cdot \sigma_\eta$, учитывающей возможные отклонения температуры от аппроксимирующей кривой.

$$T(t) = T_{cp} + \sum_{j=1}^N A_j \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{y_j} \cdot t + \varphi_j\right) + g \cdot (t - t_p) \pm t_\alpha \cdot \sigma_\eta, \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) следует, что прогнозные значения температуры воздуха будут находиться в полосе значений, что обусловлено наличием случайной составляющей в ее составе. Ширина полосы определяется квантилью распределения Стьюдента t_α при двусторонней критической области, с числом степеней свободы $n-1$ и уровнем значимости α , а также средним квадратическим отклонением σ_η случайной величины η . Кроме того, необходимо отметить, что полученная таким образом формула отно-

сится к числу экстраполяционных формул. Поэтому точность прогнозных расчетов по ней будет уменьшаться с ростом периода прогноза. Обычно считается, что удовлетворительные результаты получаются при отношении периода прогноза к периоду наблюдений не более 1/3. Для увеличения периода прогноза следует привязывать метеорологические станции с короткими рядами наблюдений за температурой воздуха к метеорологическим станциям с более длинными рядами, тем самым, увеличивая базовый интервал времени и уточняя прогнозные формулы. Приведение коротких рядов наблюдений осуществляется известными методами (Брукс, Карузерс, 1963).

Поясним изложенную методику примером нахождения прогнозной формулы по метеорологической станции города Якутска, имеющей 169-летний ряд наблюдений за температурой воздуха.

На рис.3.1. показан ход среднегодовой температуры воздуха в Якутске за период с 1830 по 1998 гг. (Хрусталеv, Медведев, Пустовойт, 2000).

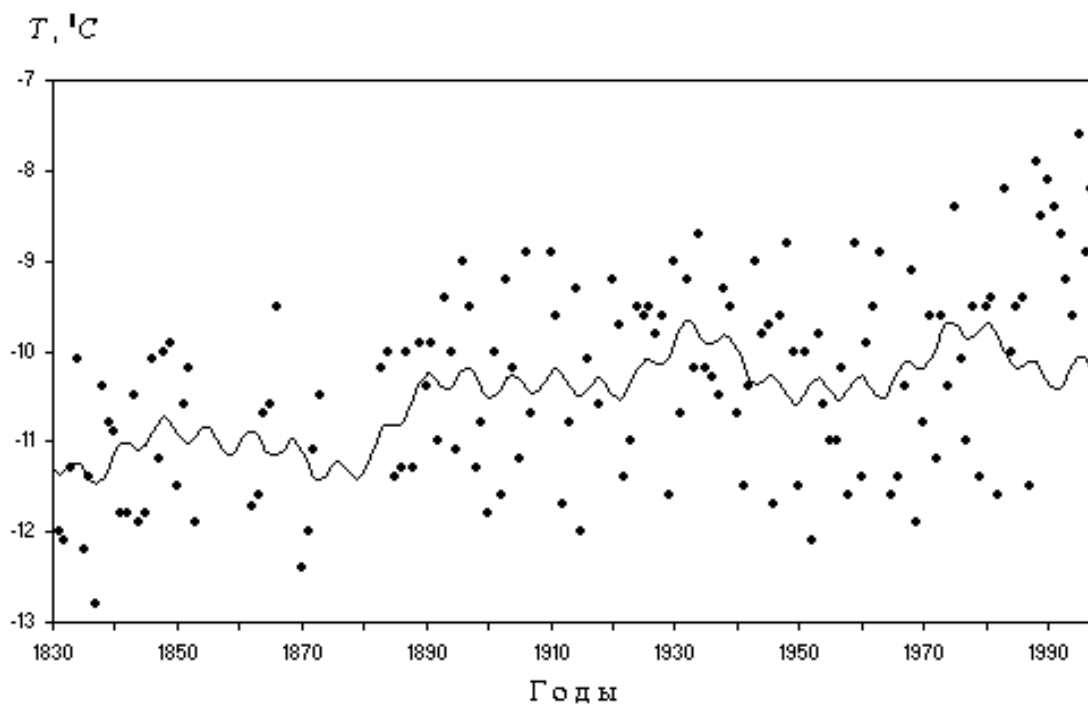


Рис. 3.1 Изменение средней годовой температуры воздуха в г. Якутск за период с 1830 по 1998 гг. (по данным наблюдений)

Как видим, температура испытывает значительные циклические колебания и имеет явную тенденцию к повышению в последние годы. Предположим, что до 1970 г. колебания температуры обусловлены только естественными причинами, а после 1970 г. к ним прибавляется антропогенный фактор, порождающий линейный тренд температуры воздуха. Примем период с 1830 по 1970 годы за базовый и аппроксимируем ход среднегодовой температуры воздуха тригонометрическим рядом вида (3.1). Параметры уравнения (3.1) подбирались методом наименьших квадратов с использо-

ванием классического алгоритма Лежандра. В результате получено пять гармоник с параметрами, указанными в табл. 3.1. При этом свободный член ряда равен $T_{\text{ср}} = -10,62^{\circ}\text{C}$. Кривая аппроксимации представлена на рис. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры тригонометрического ряда

Номер (J)	Период (y_j), лет	Амплитуда (A_j), $^{\circ}\text{C}$	Фаза φ_j , рад
1	7,0	0,13	1,70
2	22,0	0,13	2,26
3	40,0	0,27	- 0,77
4	88,0	0,19	3,13
5	300,0	0,56	4,32

Ряд флуктуаций представляет собой центрированный случайный процесс с дисперсией $0,778^{\circ}\text{C}^2$. Его нормированная автокорреляционная функция показана на рис. 3.2. Как видно, она весьма быстро затухает, значения ее для сдвигов, отличных от нуля, не превосходят 0,18 и не являются статистически значимыми. Каких-либо регулярных изменений данная функция не претерпевает. Все это позволяет предположить, что ряд флуктуаций среднегодовой температуры воздуха представляет собой последовательность некоррелированных случайных величин с конечной дисперсией. Такая последовательность в статистике называется белым шумом. Итак, ход среднегодовой температуры воздуха за базовый период есть периодический процесс со случайной составляющей η , дисперсия которой равна $\sigma_{\eta}^2 = 0,778^{\circ}\text{C}^2$, среднее значение – $\eta = 0,0^{\circ}\text{C}$.

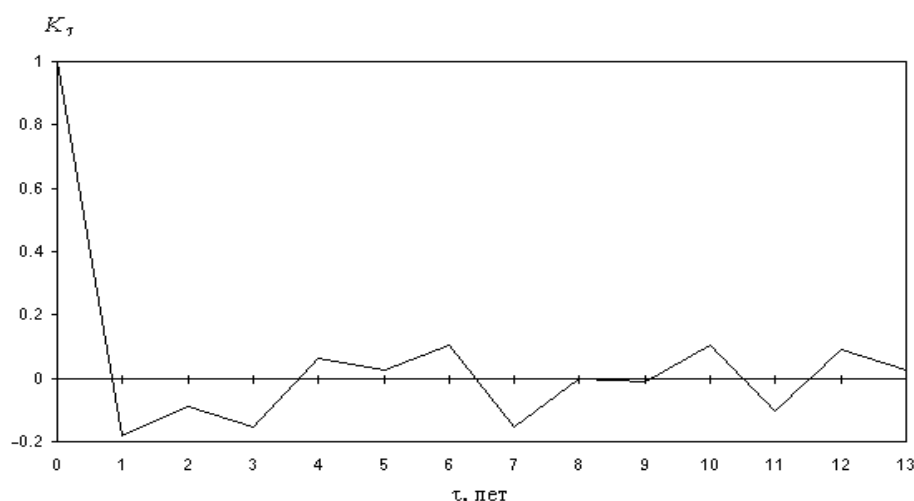


Рис. 3.2
Нормированная автокорреляционная функция флуктуации среднегодовой температуры воздуха

Для выявления антропогенного тренда среднегодовой температуры воздуха проанализируем ряд ее флуктуаций за период с 1971 по 1998 гг. Разобьем этот ряд по интервалам времени на выборки, равные 7-ми годам

(скользящие семилетия). Подсчитаем для них средние значения и дисперсии и сравним со средним и дисперсией базового ряда, который примем за генеральную совокупность. Если различия статистически не значимы, то выборки представляют ту же самую генеральную совокупность, и значит, естественный ход среднегодовой температуры воздуха не нарушается, в противном случае можно подозревать появление некоторого дополнительного фактора, изменяющего структуру метеорологического ряда.

Для каждой семилетней выборки по формуле (3.3) рассчитаем две величины S и H и сопоставим их с предельными значениями, которые для нашего случая (число степеней свободы 6, уровень значимости 0,05) равны: $S_u = 1,94$, $H_{u1} = 1,24$, $H_{u2} = 14,4$. Результаты расчета (табл. 3.2) показывают, что с 1983 года структура метеорологического ряда нарушается.

Таблица 3.2

Результаты сравнения выборок до выделения тренда

Период	η , °C	σ_η^2 , °C ²	S , безразм.	H , безразм.
1971 – 1977	- 0,23	0,744	- 0,71	5,74
1972 – 1978	- 0,25	0,714	- 0,80	5,51
1973 – 1979	- 0,31	0,841	- 0,89	6,48
1974 – 1980	- 0,30	0,843	- 0,88	6,50
1975 – 1981	- 0,16	0,845	- 0,45	6,52
1976 – 1982	- 0,59	0,722	- 1,83	5,56
1977 – 1983	- 0,29	1,399	- 0,66	10,79
1978 – 1984	- 0,11	1,280	- 0,25	9,87
1979 – 1985	- 0,06	1,340	- 0,13	10,34
1980 – 1986	0,29	0,947	0,78	7,30
1981 – 1987	0,07	1,285	0,16	9,91
1982 – 1988	0,34	1,826	0,66	14,08
1983 – 1989	0,83	1,232	1,97	9,50
1984 – 1990	0,89	1,386	2,01	10,69
1985 – 1991	1,16	1,406	2,59	10,84
1986 – 1992	1,30	1,390	2,93	10,72
1987 – 1993	1,35	1,353	3,07	10,44
1988 – 1994	1,62	0,331	7,44	2,55
1989 – 1995	1,66	0,388	7,05	2,99
1990 – 1996	1,59	0,415	6,52	3,20
1991 – 1997	1,55	0,376	6,69	2,90
1992 – 1998	1,48	0,343	6,68	2,64

$$\Delta T(t) = g \cdot (t - 1982) + eta, \quad (3.5)$$

Мы предполагаем, что причиной нарушения явился линейный тренд повышения среднегодовой температуры воздуха, обусловленный антропогенным фактором $\Delta T(t)$, причем до 1983 года $\Delta T(t) = 0$. Параметры тренда находим методом наименьших квадратов по ряду флуктуаций η на отрезке времени 1983 – 1998 гг.: $g = 0,066$ °C/год, $eta = 0,735$ °C. Наличие в выражении (3.5) свободного члена eta указывает на то, что потепление началось

несколько раньше и только к 1983 г. достигло уровня статистически значимого по критерию Стьюдента.

Если предположение о наличии тренда правильно, то введение линейной составляющей в формулу аппроксимации (3.1) позволит восстановить естественный временной ход флуктуаций температуры воздуха. В этом случае исправленный ряд флуктуаций будет равен:

$$\mu = \eta - \Delta T(t), \quad (3.6)$$

В отличие от ряда η , ряд μ должен быть статистически однородным. Сравнение средних и дисперсий случайной величины μ на отрезке 1983 – 1998 гг. и на базовом отрезке времени (табл. 3.3) не выявляет статистически значимых различий, что указывает на правильность сделанного предположения.

Таблица 3.3

Результаты сравнения выборок после выделения тренда

Период	μ , °С	σ_μ^2 , °С ²	S , безразм.	H , безразм.
1983 – 1989	- 0,15	1,286	- 0,35	9,92
1984 – 1990	- 0, 15	1,277	- 0,36	9,84
1985 – 1991	0,05	1,296	0,11	10,00
1986 – 1992	0,12	1,289	0,29	9,94
1987 – 1993	0,10	1,307	0,24	10,08
1988 – 1994	0,31	0,488	1,19	3,76
1989 – 1995	0,28	0,449	1,12	3,46
1990 – 1996	0,15	0,501	0,54	3,87
1991 – 1997	0,04	0,393	0,18	3,03
1992 – 1998	- 0,09	0,326	0,44	2,51

Таким образом, ход среднегодовой температуры воздуха с 1983 г. есть периодический процесс с линейным трендом и случайной составляющей μ , имеющей нулевое математическое ожидание и дисперсию 0,778 °С² ($\sigma_\mu = \sigma_\eta = 0,88$ °С). Теперь, чтобы написать окончательную формулу, нам не хватает только численного значения поправки на вероятные отклонения средней годовой температуры воздуха. Для двусторонней критической области и уровне значимости $\alpha = 0,05$, а также длине базового ряда 141 (степень свободы равна 140) величине t_α будет соответствовать число 1,66. Помножив ее на среднее квадратическое отклонение, найдем поправку:

$$t_\alpha \sigma_\eta = 1,66 \cdot 0,88 = 1,46 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Эта поправка определяет ширину полосы возможных отклонений средней годовой температуры воздуха равной 2,92 °С. Полоса покрывает большую часть фактических данных на базовом и текущем интервале. Это

позволяет надеяться на хорошее совпадение расчетных и фактических данных в будущем (на прогнозном интервале времени).

Итак, с учетом полученных численных оценок окончательно можем записать:

$$T(t) = -9,89 + \sum_{j=1}^5 A_j \sin[2\pi(t + \varphi_j)/\tau_j] + 0,066(t - 1983) \pm 1,46, \quad (3.7)$$

где t – год прогноза, например, 2035; численные значения A_j , φ_j , τ_j , приведены в табл. 3.1.

На кафедре геокриологии А.В. Медведевым была разработана компьютерная программа, которая значительно облегчает описанную выше вычислительную процедуру. Программа состоит из двух частей. Первая часть производит аппроксимацию данных наблюдений тригонометрическим полиномом, вторая – выявляет антропогенный тренд (если он присутствует) и находит его параметры. Решение задачи осуществляется на основе «человеко – машинной» операции. Вначале пользователь вводит данные наблюдений за средней годовой температурой воздуха, количество гармоник и их период и задает предполагаемый год начала линейного тренда (рубежный год). Программа разделяет период наблюдений на базовый (до начала тренда) и текущий (с трендом) и обрабатывает базовый ряд: находит параметры гармоник, строит ряд флуктуаций и находит его дисперсию и автокорреляционную функцию. По виду последней пользователь принимает решение о достаточности (недостаточности) количества гармоник, при необходимости уточняет их параметры или увеличивает их число или изменяет длину базового ряда, задавая рубежный год. Диалог с машиной продолжается до тех пор, пока ряд флуктуаций не будет представлять «белый шум». Далее дается команда на обработку текущего ряда. Машина разбивает текущий ряд на скользящие семилетия, находит для них критерии S и H , значение которых отображает на экране. Если эти критерии удовлетворяют условию (3.3), то пользователь принимает решение об отсутствии тренда и прекращает вычислительный процесс. В противном случае, пользователь первый год семилетия, где хотя бы один из критериев нарушает условие (3.3), принимает за рубежный и дает команду машине на определение тренда, случайной величина μ и соответствующих ей критериев S и H , начиная с рубежного года. Критерии S и H отображаются на экране и проверяются пользователем на выполнение условия (3.3). Если оно выполняется, то вычислительная процедура заканчивается и записывается прогнозная формула, в противном случае пользователь корректирует гармоники, рубежный год и повторяет процедуру.

Используя данную методику, нами были получены прогнозные формулы для 70-ти метеостанций, расположенных на Европейском Севере в Западной, Средней и Восточной Сибири.

Общая запись формулы приведена в выражении (3.8), ее параметры для конкретных метеостанций даны в таблицах приложений 1.

$$T(t) = T_{cp} + eta + \sum_{j=1}^N A_j \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{y_j} \cdot t + \varphi_j\right) + g \cdot (t - t_p) \pm t_{\alpha} \cdot \sigma_{\eta}, \quad (3.8)$$

где eta – поправка к T_{cp} , $^{\circ}\text{C}$; остальные обозначения указаны в формулах 3.1. и 3.4.

Пользуясь указанной формулой, можно составить прогноз среднегодовой температуры воздуха на ближайшие 30 – 50 лет и на его основе построить ряд прогнозных карт на рассматриваемую территорию. Однако, чтобы приступить к указанной работе необходимо вначале убедиться в правильности составленных формул. Для этого следует воспользоваться данными наблюдений на отрезке времени, который не вошел в авторетроспективный анализ и оказался за его пределами. В нашем случае это будет период с 1998-2001 г. по 2009 г.

3.2. Верификация прогнозных формул изменения температуры воздуха

Для проверки прогнозной формулы нами использовались ряды наблюдений по 8 метеостанциям (Архангельск, Воркута, Салехард, Марре-Сале, Дудинка, Малые Кармакулы, Якутск, Верхоянск). Результаты проверки показаны на графиках (рис. 3.3. – 3.10.). Сплошная линия с точками – данные наблюдений; пунктирные линии – верхний и нижний предел значений, вычисляемых по прогнозным формулам.

Из рассмотрения графиков на рис. 3.3. – 3.10. следует, что из 79 точек наблюдений за средней годовой температурой воздуха в полосу значений этой температуры, определяемых прогнозными формулами, попадает 57 точек или 72 % всех данных по температуре. Такой результат можно считать удовлетворительным, особенно учитывая два момента:

- интервал сравнения не входил в период, на котором были получены прогнозные формулы;
- при получении прогнозных формул не применялись сглаживающие фильтры, которые улучшают вид функциональной зависимости, но сужают ее область использования.

Таким образом, разработанная методика с успехом может быть использована для прогнозов среднегодовой температуры воздуха на ближайшие 30 – 50 лет.

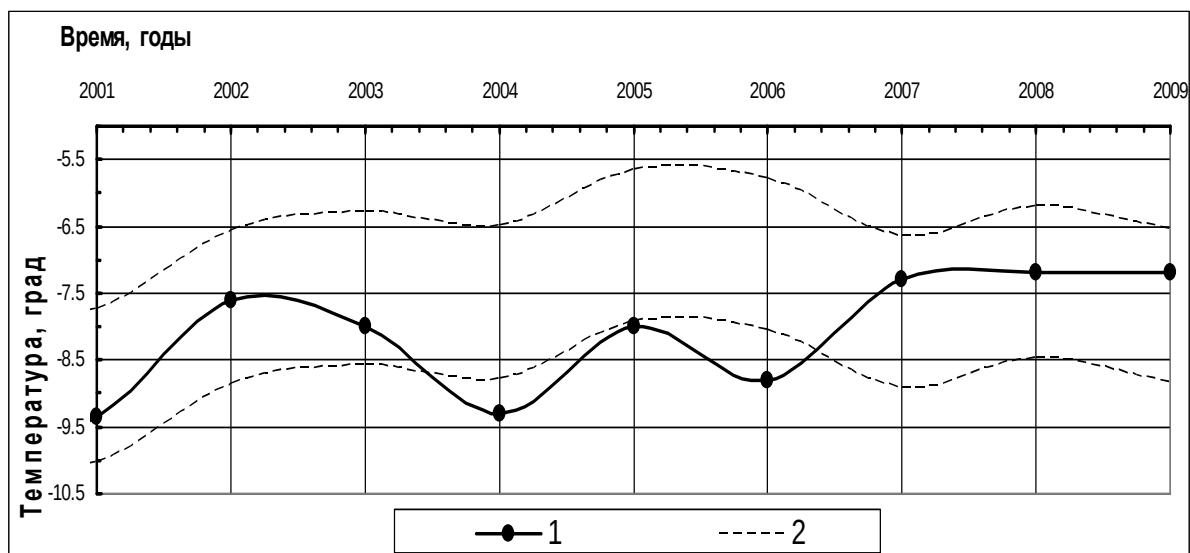


Рис. 3.3 Верификация прогнозной формулы по определению среднегодовой температуры воздуха м.с. Якутск, полученной на отрезке времени 1886-2001 гг:

1 – фактический ход среднегодовой температуры воздуха, 2 – границы возможных значений прогнозной среднегодовой температуры воздуха с вероятностью 0,85

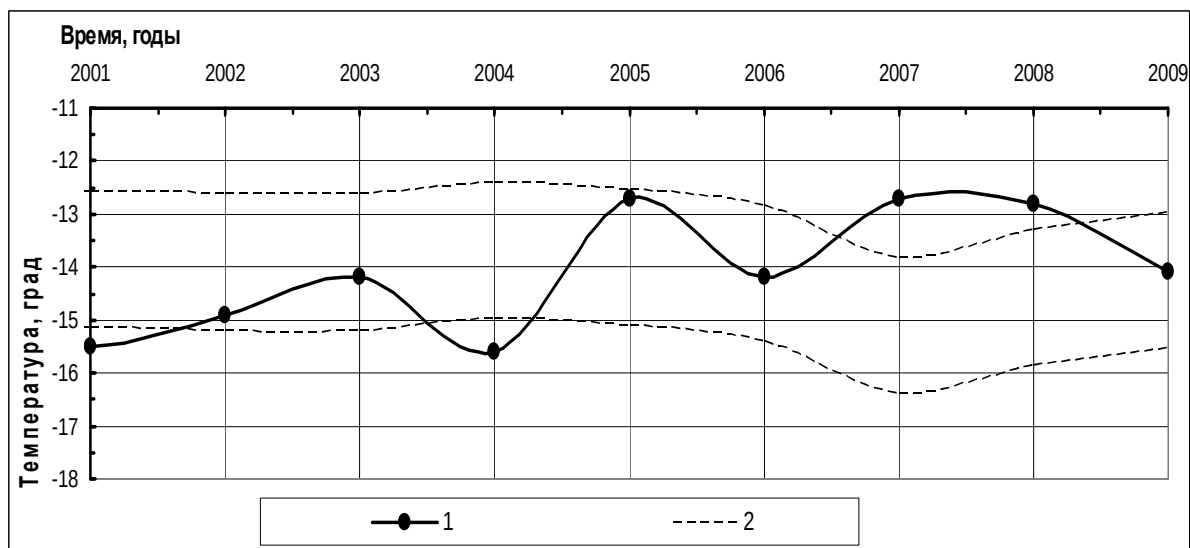


Рис. 3.4 Верификация прогнозной формулы по определению среднегодовой температуры воздуха м.с. Верхоянск, полученной на отрезке времени 1886-2001 гг:

1 – фактический ход среднегодовой температуры воздуха, 2 – границы возможных значений прогнозной среднегодовой температуры воздуха с вероятностью 0,85

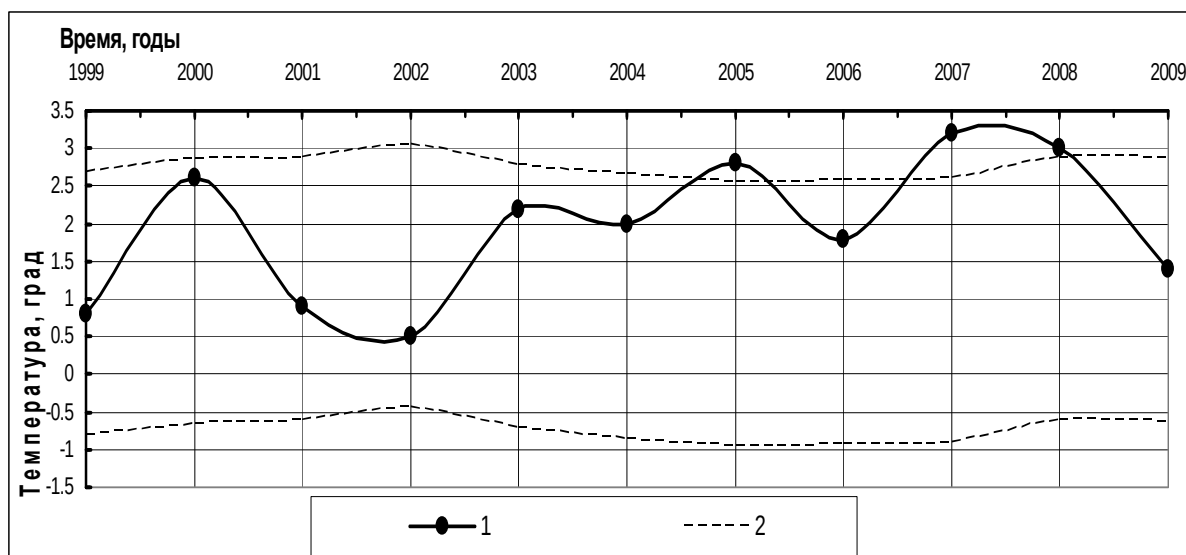


Рис. 3.5 Верификация прогнозной формулы по определению среднегодовой температуры воздуха м.с. Архангельск, полученной на отрезке времени 1814-1999 гг:

1 – фактический ход среднегодовой температуры воздуха, 2 – границы возможных значений прогнозной среднегодовой температуры воздуха с вероятностью 0,85

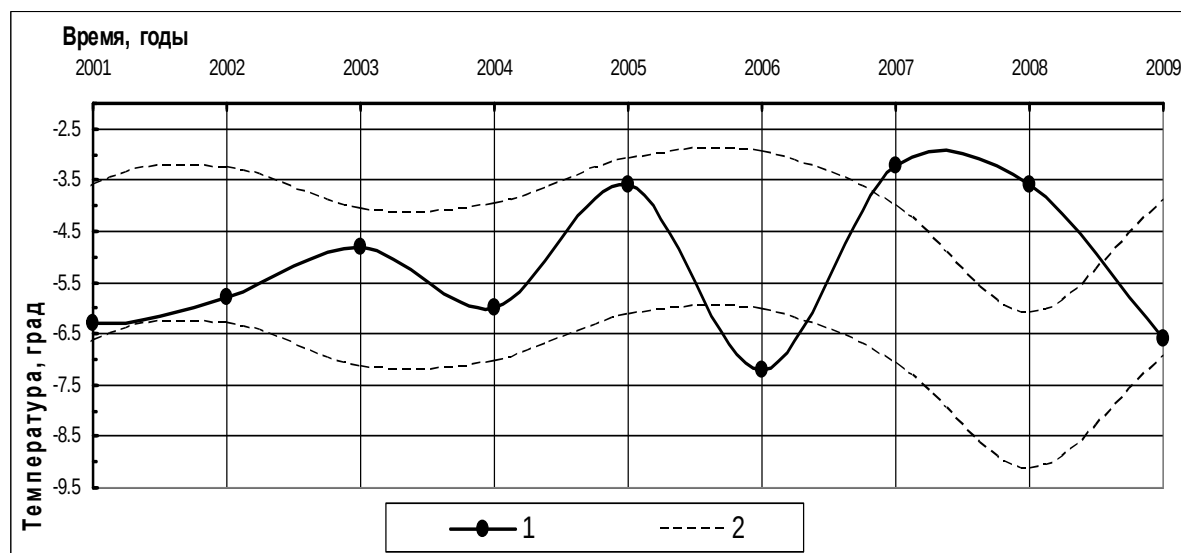


Рис. 3.6 Верификация прогнозной формулы по определению среднегодовой температуры воздуха м.с. Салехард, полученной на отрезке времени 1883-2001 гг:

1 – фактический ход среднегодовой температуры воздуха, 2 – границы возможных значений прогнозной среднегодовой температуры воздуха с вероятностью 0,85

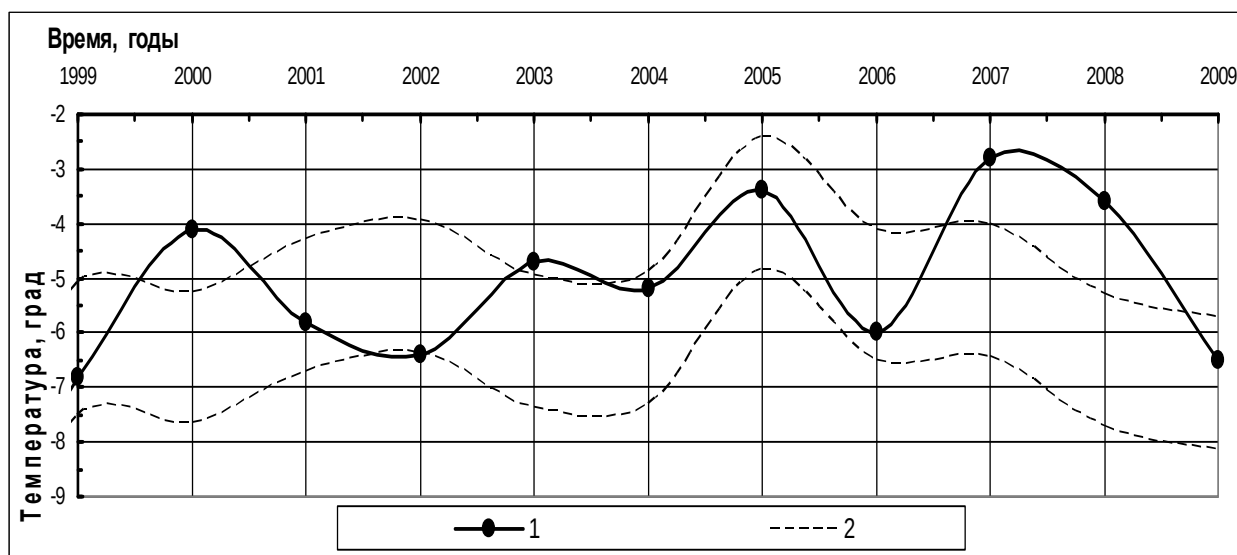


Рис. 3.7 Верификация прогнозной формулы по определению среднегодовой температуры воздуха м.с. Воркута, полученной на отрезке времени 1927-1999 гг:

1 – фактический ход среднегодовой температуры воздуха, 2 – границы возможных значений прогнозной среднегодовой температуры воздуха с вероятностью 0,85

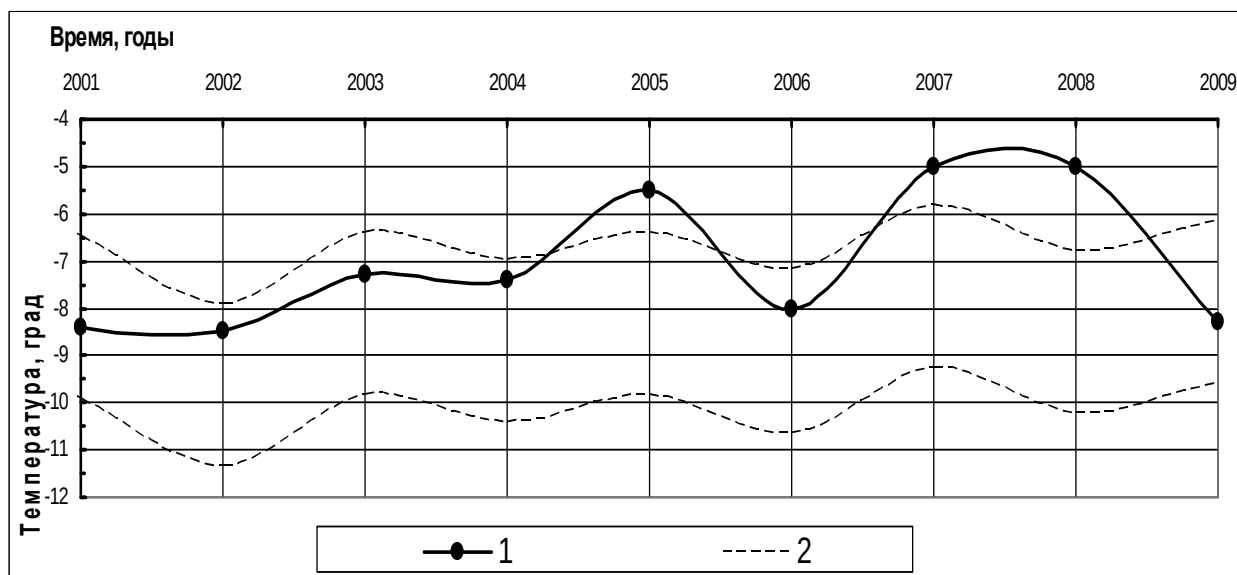


Рис. 3.8 Верификация прогнозной формулы по определению среднегодовой температуры воздуха м.с. Марре-Сале, полученной на отрезке времени 1928-2001 гг:

1 – фактический ход среднегодовой температуры воздуха, 2 – границы возможных значений прогнозной среднегодовой температуры воздуха с вероятностью 0,85

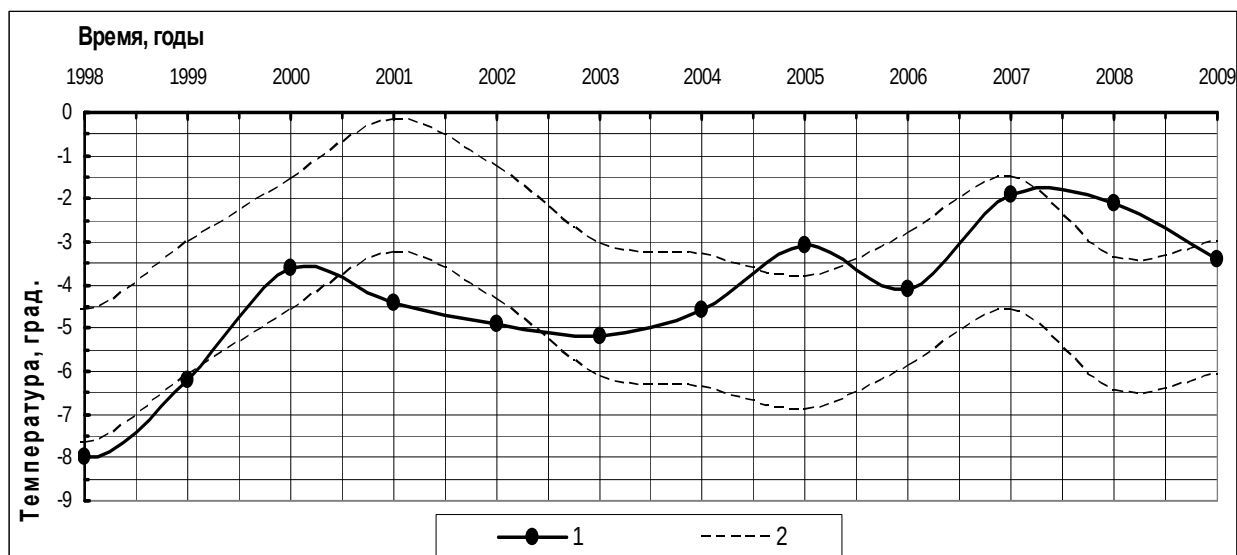


Рис. 3.9 Верификация прогнозной формулы по определению среднегодовой температуры воздуха м.с. Малые Кармакулы, полученной на отрезке времени 1897-1998 гг:

1 – фактический ход среднегодовой температуры воздуха, 2 – границы возможных значений прогнозной среднегодовой температуры воздуха с вероятностью 0,85

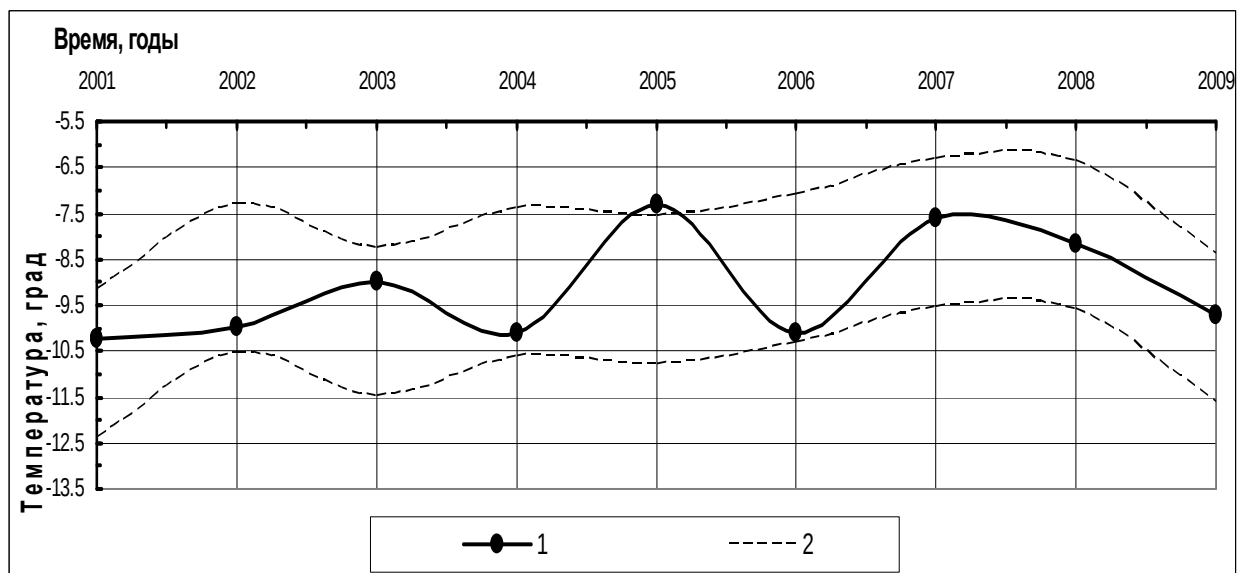


Рис. 3.10 Верификация прогнозной формулы по определению среднегодовой температуры воздуха м.с. Дудинка, полученной на отрезке времени 1933-2001 гг:

1 – фактический ход среднегодовой температуры воздуха, 2 – границы возможных значений прогнозной среднегодовой температуры воздуха с вероятностью 0,85

3.3. Прогноз изменения температуры воздуха на ближайшие 30-50 лет

В разделе 3.1 обоснована методика прогноза температурного режима воздуха и получены формулы, позволяющие получить динамику температуры на любой момент времени в будущем. Результаты этого прогноза позволяют как выявить тенденции изменения среднегодовой температуры воздуха за счет естественноисторических причин, так и определить тренд повышения температуры за счет антропогенных факторов. Используя предложенную методику (раздел 3.1.), был составлен прогноз среднегодовой температуры воздуха на ближайшие 30 – 50 лет для ряда пунктов, расположенных на территории Европейского Севера России, Западной, Средней и Восточной Сибири.

Европейский Север России. Анализ проводился по данным наблюдений на 12 метеостанциях, расположенных как на территории криолитозоны, так и за ее пределами. Схема расположения пунктов наблюдений показана на рис. 3.11.

Проведенные исследования показывают, что вслед за заметным повышением среднегодовой температуры воздуха, которая отмечается в 2005-2009 гг., прогнозируется ее понижение вплоть до 2035-2040 гг. В частности эта тенденция отчетливо прослеживается по данным наблюдений на м.с. Малые Кармакулы, Воркута и Канин Нос (рис. 3.12). На этом рисунке показана ежегодная динамика среднегодовой температуры воздуха по данным метеонаблюдений (кривая 1), осредненные десятилетними скользящими температура воздуха (кривая 2), прогнозная осредненная десятилетними скользящими кривая температуры воздуха, полученная по данным гармонического анализа без учета возможного повышения температуры воздуха за счет антропогенных факторов (кривая 3) и прогнозная кривая динамики температуры воздуха с учетом антропогенного повышения температуры воздуха (кривая 4). Из этого рисунка отчетливо видно, что на отрезке времени, когда проводились метеонаблюдения, кривые, полученные по результатам натурных наблюдений (кривая 2) и кривые, полученные по результатам гармонического анализа (кривая 3), достаточно хорошо совпадают. Это подтверждает правомочность использования метода анализа и прогноза температурного режима воздуха, использованного авторами.

По результатам прогноза повышение температур воздуха по всем метеостанциям за период с 2035-2040 гг. до 2060 г. не превысит или незначительно превысит значения, зафиксированные в современный период. Анализ табл. 3.4 и рис. 3.12 показывает, что в целом на территории Европейского Севера тренды повышения температур воздуха за счет антропогенных факторов незначительны. Максимальные значения тренда (до 0,033-0,035 °C/год) отмечаются на Кольском полуострове (метеостанции Мурманск, Кола) и в южных районах территории (метеостанции Троицко-

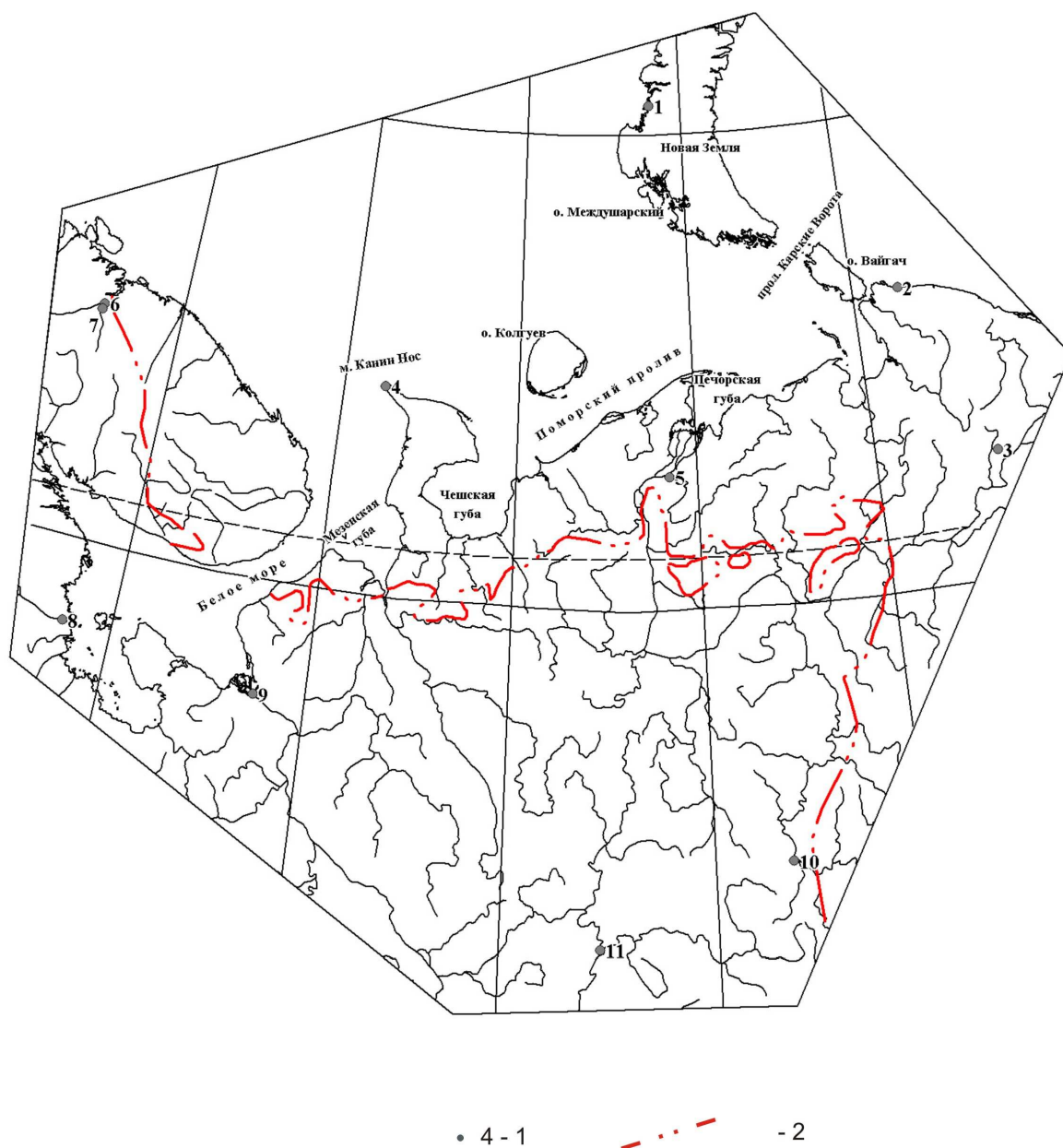


Рис. 3.11 Схема размещения метеостанций на территории Европейского Севера России:

1 – метеостанция и ее номер: 1 – Малые Кармакулы, 2 – Амдерма, 3 – Воркута, 4 – Канин Нос, 5 – Нарьян-Мар, 6 – Мурманск, 7 – Кола, 8 – Кемь, 9 – Архангельск, 10 – Троицко-Печерское, 11 – Сыктывкар; 2 – южная граница распространения многолетнемерзлых пород

Печерское, Сыктывкар, Бисер). Однако эти пункты расположены за пределами криолитозоны. Незначительный тренд антропогенного повышения среднегодовой температуры воздуха ($0,001^{\circ}\text{C}/\text{год}$) прогнозируется на южном острове архипелага Новая Земля (рис. 3.12). На остальной территории криолитозоны Европейского Севера значение антропогенного тренда

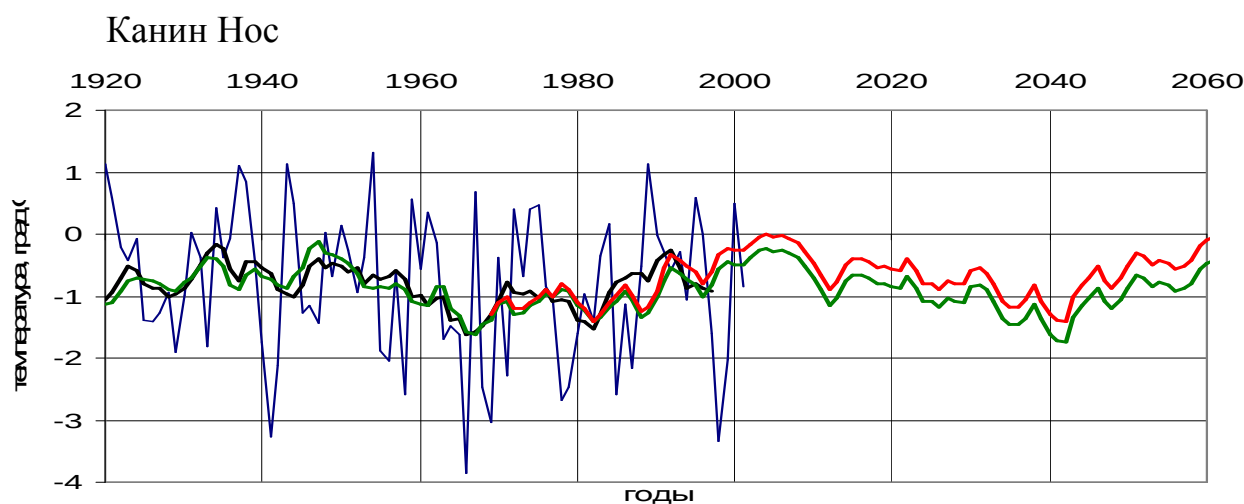
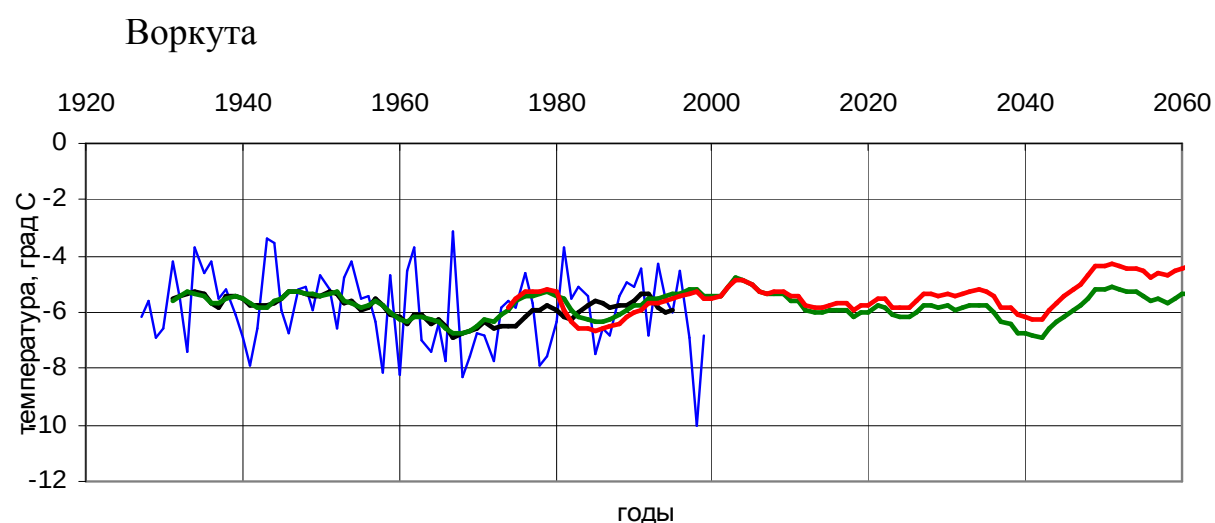
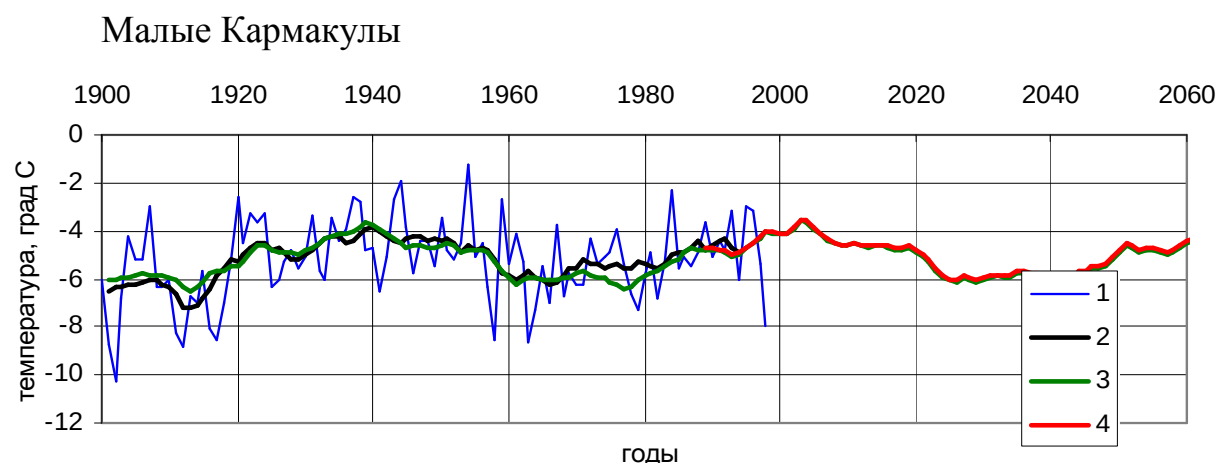


Рис. 3.12 Динамика температуры воздуха по некоторым метеостанциям Европейского Севера России:

1 – среднегодовая температура по метеоданным; 2 – сглаженная 10-летними скользящими кривая по метеоданным; 3 – сглаженная 10-летними скользящими кривая по результатам гармонического разложения без учета антропогенного тренда; 4 – сглаженная 10-летними скользящими кривая по результатам гармонического разложения с учетом антропогенного тренда

изменяется незначительно и лежит в пределах от 0,005 до 0,008 °С/год (приложение 1). Столь незначительные тренды антропогенного повышения среднегодовой температуры воздуха позволяют разделить территорию всего на две достаточно крупные области (рис. 3.13).

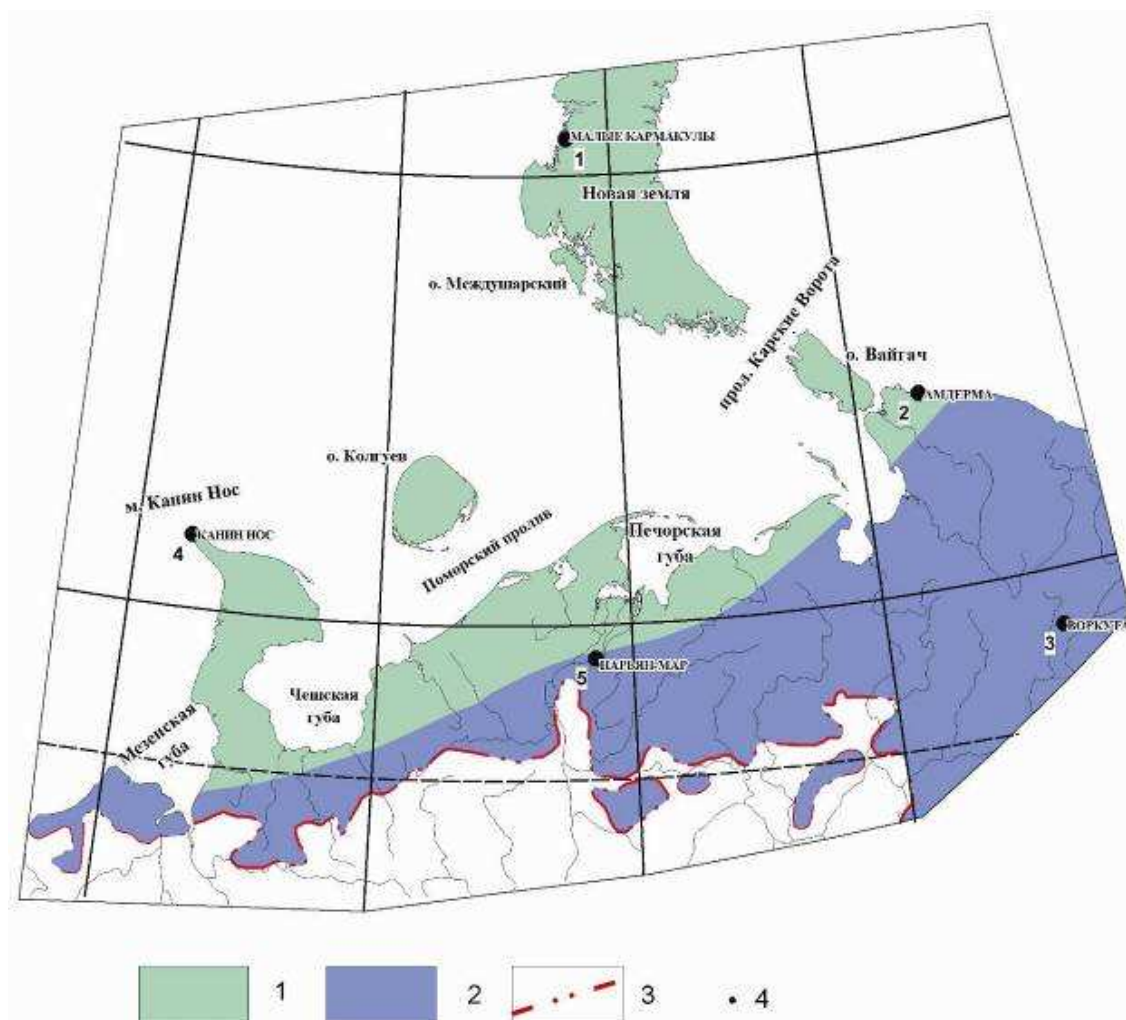


Рис. 3.13 Схема районирования Европейского Севера России по величине тренда повышения среднегодовой температуры воздуха:
1 и 2 – тренд повышения температуры воздуха: 1 – 0,001- 0,005°С/год;
2 – 0,005 - 0,008°С/год; 3 – южная граница распространения
многолетнемерзлых пород; 4 – местоположение и номер метеостанции

Западная Сибирь. Анализ проводился по методике, изложенной в разделе 3.1 по данным наблюдений на 17 метеостанциях, расположенных как на территории криолитозоны, так и за ее пределами. Схема расположения метеостанций показана на рис 3.14. Результаты прогнозных расчетов для некоторых метеостанций показаны на рис. 3.15. Результаты прогноза показывают, что для некоторых пунктов (например, м.с. Марре-Сале) изменение среднегодовой температуры в будущем аналогичны выявленным тенденциям для Европейского Севера. Для северных районов с настоящего

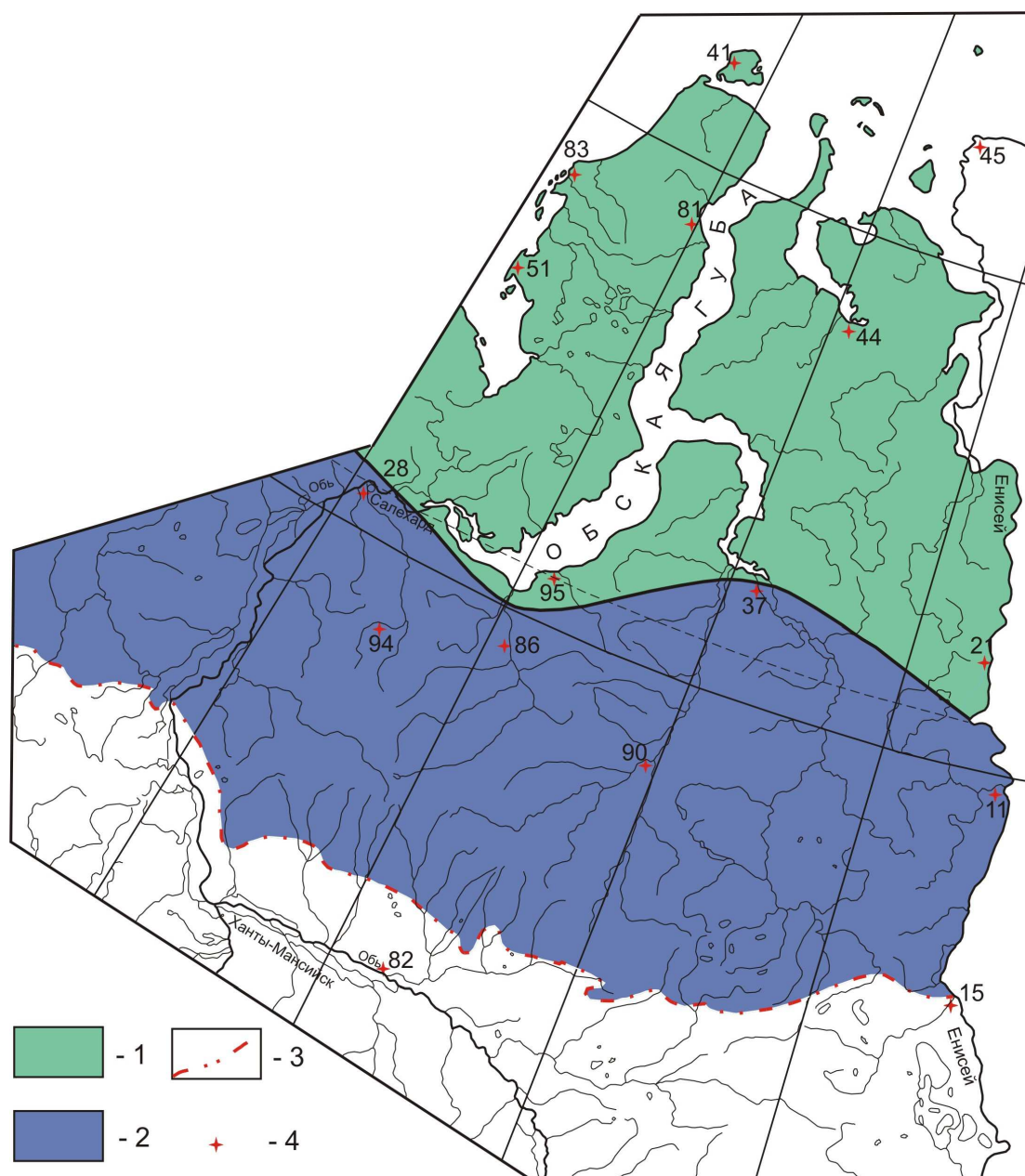


Рис. 3.14 Схема районирования севера Западной Сибири по величине тренда повышения среднегодовой температуры воздуха:

1, 2 – тренд температуры воздуха равен: 1 – $0,003 - 0,01^{\circ}\text{C}/\text{год}$; 2 – $0,01 - 0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$; 3 – южная граница распространения многолетнемерзлых пород; 4 – местоположение и номер метеостанции: 45 – Диксон, 41 – о. Белый, 44 – Гыдойма, 81 – Тамбей, 83 – Харасавэй, 51 – Марре-Сале, 37 – Тазовское, 21 – Игарка, 28 – Салехард, 95 – Ныда, 11 – Туруханск, 86 – Надым, 90 – Тарко-Сале, 94 – Полуй, 15 – Верхне-Имбатское, 82 – Сургут

времени и до начала 2040-х годов ожидается устойчивое понижение среднегодовой температуры воздуха. Затем до начала 2060 годов прогнозируется повышение среднегодовой температуры, которое не превысит современных значений. Вместе с тем, для некоторых метеостанций, например м.с. Салехард, Дудинка ход температуры воздуха в будущем существенно

отличается. Так для района Салехарда отмечается незначительное понижение температуры воздуха к 2011 г. Затем до 2060 г. прогнозируется повышение среднегодовой температуры воздуха. Проведенные расчеты показали, что антропогенное повышение температуры воздуха отмечается для всех рассмотренных пунктов Западной Сибири. Анализ полученных результатов показывает, что численные значения линейного тренда повышения среднегодовой температуры воздуха лежат в диапазоне от 0,003-0,006 °С/год в тундровой зоне на северном и западном побережье п-ова Ямал (о. Белый, Харасавэй), до 0,02-0,027 °С/год в зоне лесотундры (Салехард, Тазовское, Тарко-Сале). Наибольшие тренды повышения среднегодовой температуры воздуха отмечаются для метеостанций, расположенных за пределами криолитозоны (Сургут, Верхне-Имбатское). Годы, с которых отмечается начало антропогенного тренда, для различных областей Западной Сибири изменяются в интервале 1961-1980 года, причем в южных районах криолитозоны начало антропогенного повышения среднегодовой температуры воздуха отмечается в более раннее время. Схема районирования севера Западной Сибири по величине тренда потепления климата показана на рис. 3.14.

Западно-Сибирская низменность в орографическом плане представляет собой равнину, в пределах которой хорошо выражена природная географическая зональность. Такая же зональность отмечается и для антропогенного повышения среднегодовой температуры воздуха. В регионе можно выделить две обширные области, отличающиеся по значениям тренда повышения температуры воздуха (рис. 3.14). В первой области, тяготеющей к тундровой зоне, величины тренда изменяются от 0,003 до 0,009 °С/год (о. Белый, Харасавэй, Марре-Сале, Ныда, Гыдойма, Игарка). На этой территории только для метеостанции Тамбей, расположенной на восточном побережье п-ва Ямал, значение тренда температуры составляет 0,014 °С/год. На представленной карте (рис. 3.14) район расположения этой метеостанции включен в область с преобладающими трендами температуры воздуха 0,003 – 0,01 °С/год. Вторая область, для которой величина антропогенного тренда температуры воздуха лежит в пределах 0,01 – 0,02 °С/год, занимает территорию прерывистого, островного и редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород. Граница, разделяющая выделенные области, тяготеет к полярному кругу и приблизительно совпадает с северной границей лесотундровой зоны.

Южнее границы распространения многолетнемерзлых пород с поверхности тренд антропогенного повышения среднегодовой температуры воздуха увеличивается.

Так, тренд повышения среднегодовой температуры воздуха для м/ст. Верхне-Имбатское составляет 0,03 °С/год, для м.с. Сургут – 0,035 °С/год. Однако эти пункты расположены за пределами криолитозоны Западной Сибири и поэтому не нашли отражения на карте.

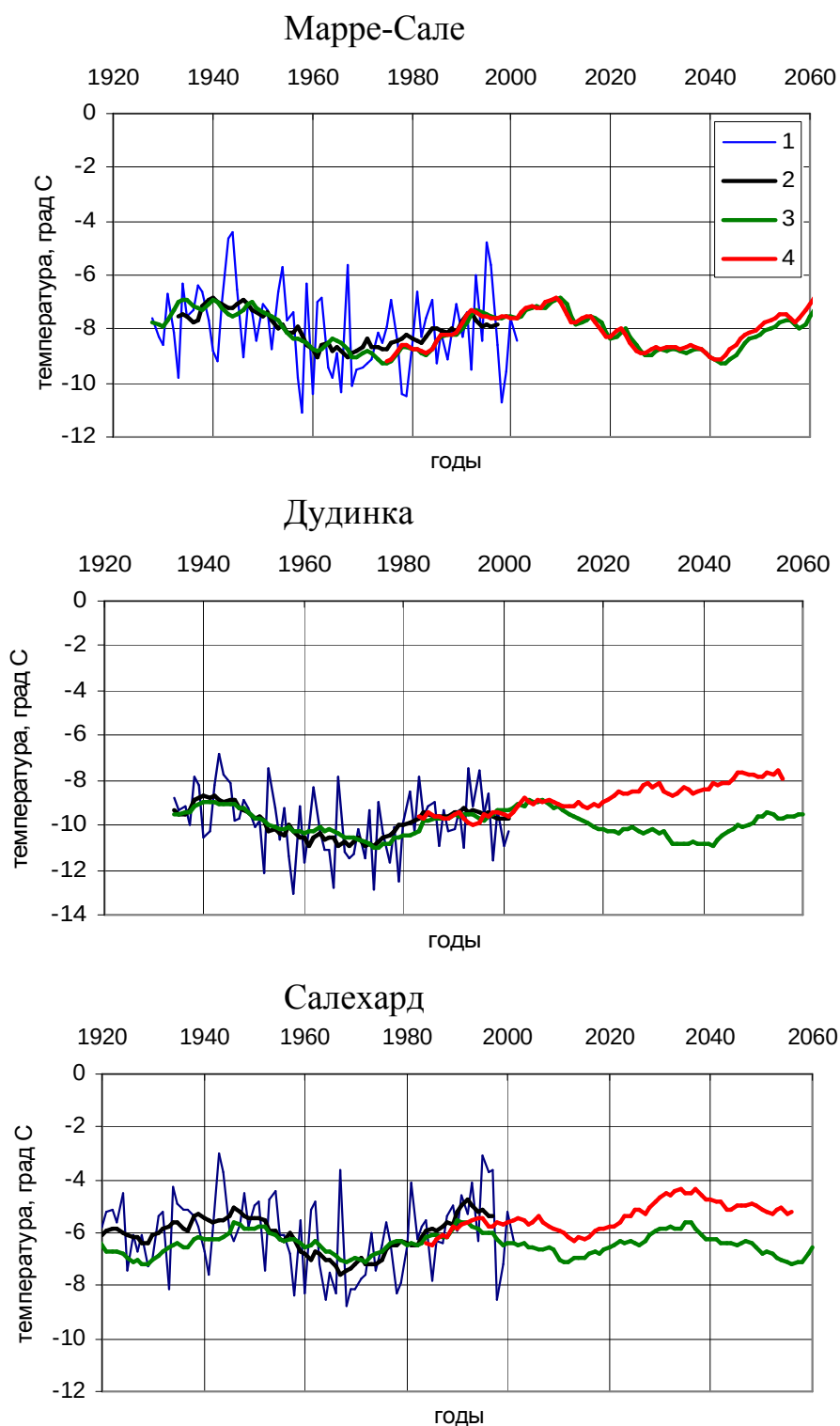


Рис. 3.15 Динамика температуры воздуха по некоторым метеостанциям Западной Сибири:

1 – среднегодовая температура по метеоданным; 2 – сглаженная 10 летними скользящими кривая по метеоданным; 3 – сглаженная 10 летними скользящими кривая по результатам гармонического разложения без учета антропогенного тренда; 4 – сглаженная 10 летними скользящими кривая по результатам гармонического разложения с учетом антропогенного тренда

Средняя и Восточная Сибирь. По методике, изложенной в разделе 3.1, по данным наблюдений на 39 метеостанциях проведен анализ изменения температурного режима воздуха в будущем. Схема расположения метеостанций показана на рис 3.16. Результаты прогнозных расчетов для двух метеостанций показаны на рис. 3.17.

Как показали расчеты, линейное повышение температуры воздуха (тренд) отмечается по данным всех метеостанций. Его минимальная величина составляет $0,011^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (метеостанция Чокурдах), максимальная – $0,088^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (метеостанция Чульман).

Прогнозируемая тенденция динамики температур воздуха существенно отличается от районов Европейского Севера и Западной Сибири. Так, для м.с. Якутск и Верхоянск в будущем прогнозируется закономерное повышение среднегодовой температуры воздуха с достаточно большими трендами, обусловленное на наш взгляд антропогенными факторами (рис. 3.17). На рис. 3.17 отчетливо видно существенное расхождение кривых, построенных по гармоническому разложению без учета тренда антропогенного потепления (кривая 3) и с его учетом (кривая 4). Достаточно сложные природные условия территории, обусловленные климатической поясностью и морфоструктурными особенностями, определяют значительное разнообразие районов с различными трендами антропогенного повышения среднегодовой температуры воздуха.

Для экстраполяции полученных расчетных данных было проведено районирование территории республики по климатическим условиям (*Хрусталева, Гарагуля, Гордеева и др. 2002*). Схема районирования территории Средней и Восточной Сибири по величине тренда повышения среднегодовой температуры воздуха показана на рис. 3.16.

В арктическом поясе, где преимущественное распространение имеют приморские низменности с абсолютными отметками до 100 м, погодные условия формируются под доминирующим влиянием арктических циклонов. Пространственная изменчивость основных среднесезонных климатических характеристик незначительна. Поэтому все низменности отнесены к одному району. Расчет тренда повышения среднегодовой температуры воздуха показал, что антропогенная динамика климата здесь существенно не различается. В западной части (м.с. Саскылах и Тикси) тренд составляет $0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а в восточной (м.с. Чокурдах) не превышает $0,011^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

В субарктическом поясе соответственно рельефу поверхности, особенностям циркуляции атмосферы и режима выпадения атмосферных осадков выделено восемь регионов. На западе рельеф Анабарского, Приангарского и Центрально-Якутского районов (II-1, 2, 3) представлен сильно денудированными плоскогорьями (абс. отм. до 1000 м), плато, денудационными и аккумулятивными равнинами. Яно-Оймяконский район (II-5)

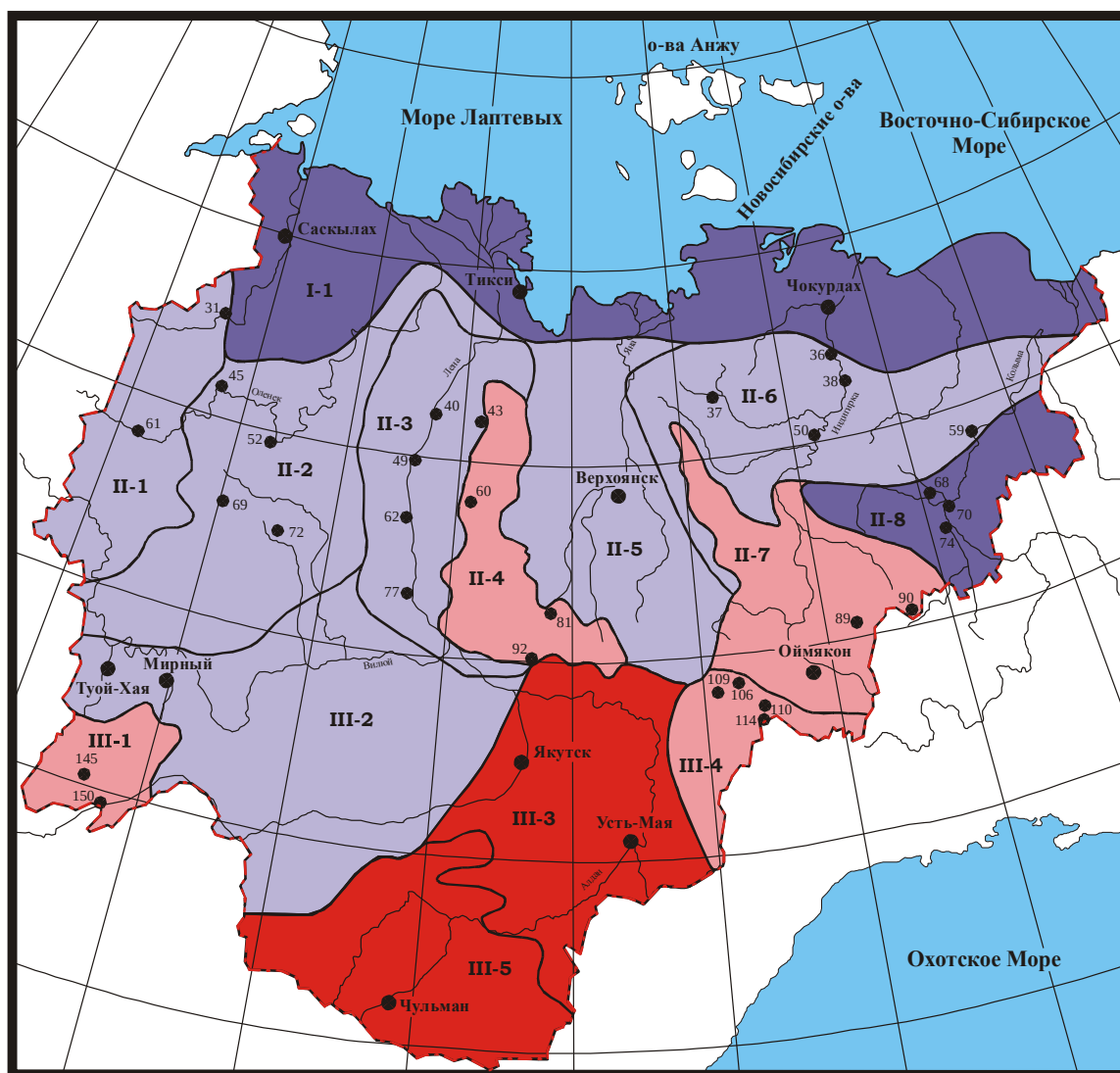


Рис. 3.16 Схема районирования территории Средней и Восточной Сибири по величине тренда повышения среднегодовой температуры воздуха. Величина тренда среднегодовой температуры воздуха, $^{\circ}\text{C}/\text{год}$:

1 – от 0,01 до 0,02; 2 – от 0,02 до 0,033; 3 – от 0,04 до 0,06; 4 – от 0,045 до 0,088; 5 – границы и индексы климатических районов; 6 – номера метеостанций: 14 – Саскылах, 19 – Тикси, 29 – Чоккурдах, 61 – Ярольин, 45 – Оленек, 52 – Маак, 69 – Шелагонцы, 72 – Эйк, 49 – Мянжяра, 62 – Жиганск, 77 – Бестяхская звероферма, 60 – Собопол, 81 – Сюрюн-Кюель, 92 – Сеген-Кюель, 55 – Верхоянск, 37 – Депутатский, 90 – Дарпир, 74 – Зырян-ка, 145 – Комака, 150 – Витим, 116 – Туой-Хая, 115 – Мирный, 126 – Якутск, 143 – Усть-Мая, 106 – Восточная, 109 – Западная, 163 – Чульман; 7 – граница района

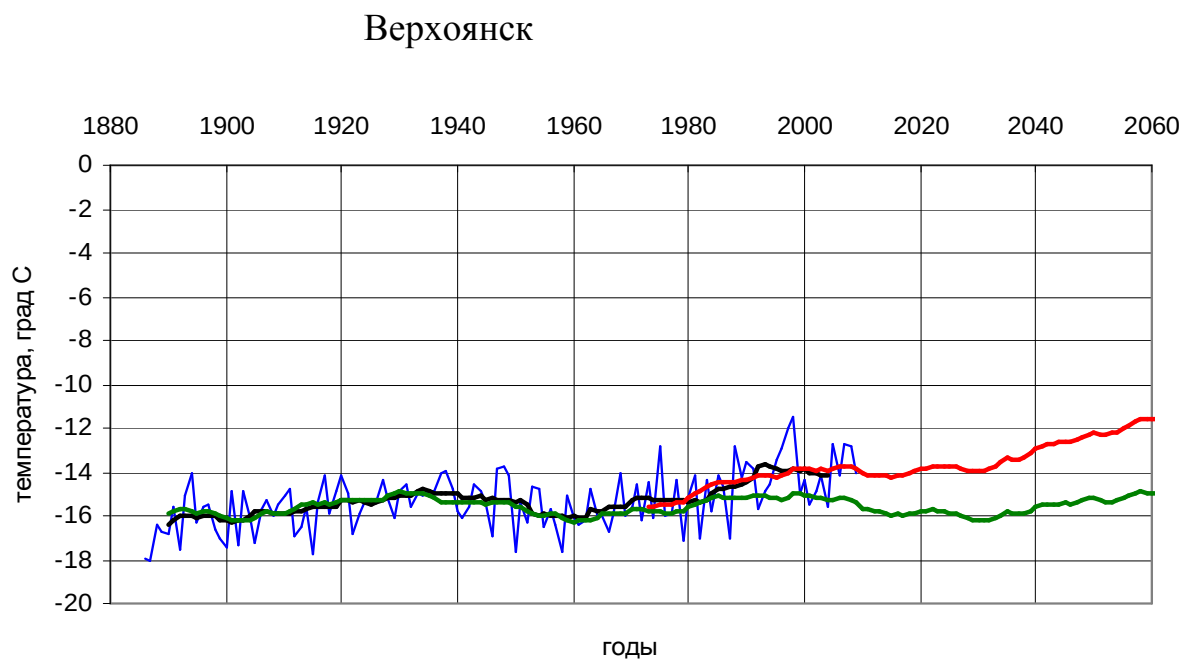
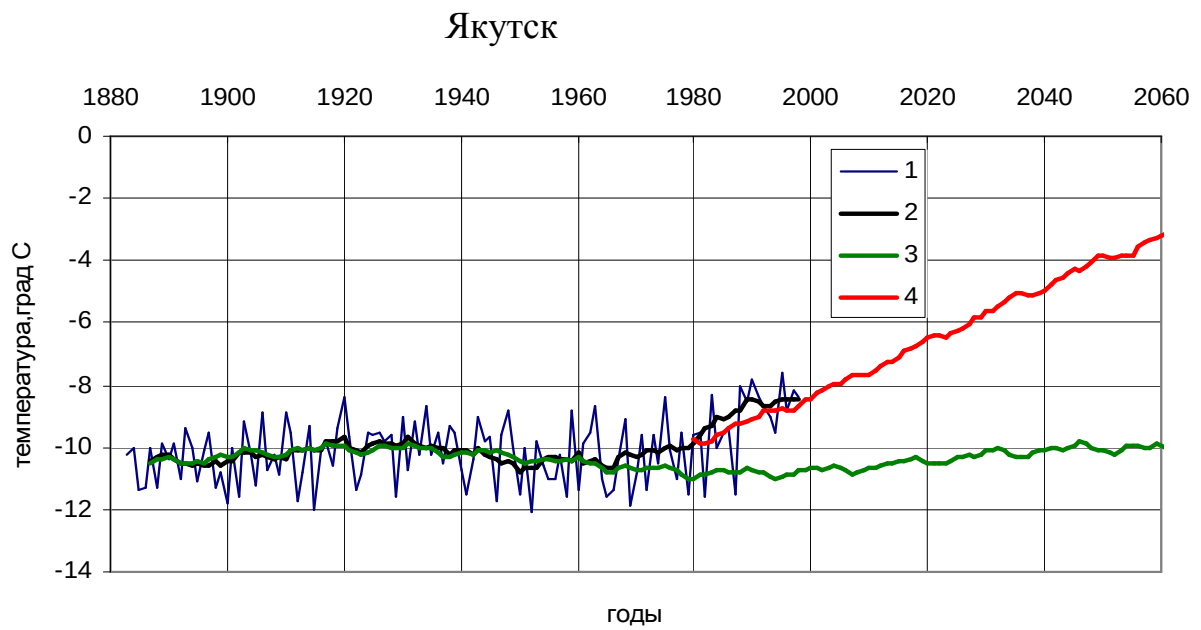


Рис. 3.17 Динамика температуры воздуха по некоторым метеостанциям Средней и Восточной Сибири:

- 1 – среднегодовая температура по метеоданным;
- 2 – сглаженная 10-летними скользящими кривая по метеоданным;
- 3 – сглаженная 10-летними скользящими кривая по результатам гармонического разложения без учета антропогенного тренда;
- 4 – сглаженная 10-летними скользящими кривая по результатам гармонического разложения с учетом антропогенного тренда

представляет собой выровненную территорию с аккумулятивными формами рельефа в бассейне р. Яна, денудационными плато и плоскогорьями с абс. отм. 200-1000 м. Сходным строением поверхности характеризуется Яно-Оймяконский, Яно-Колымский и Юкагиро-Аньюйский районы (II-5, 6, 8), хотя в последних двух более широкое распространение имеют аккумулятивные равнины с абс. отм. 100-200 м. Два района – Верхоянский (II-4) и Черско-Момский (II-7) представляют собой горные сооружения с абс. отм. 1000-2000 м и выше. Климат на всей этой территории, входящий в субарктический пояс, чрезвычайно суровый, особо резко континентальный, зимой максимальная высота снега преимущественно составляет 0,4 м. По величине тренда температуры воздуха территория неоднородна. Возможно это связано с особенностями стратификации и изменением влагосодержания атмосферы в широтном направлении в условиях "замкнутости" территорий высокими горными сооружениями, препятствующими адвекции воздушных масс. В пределах большей части субарктического пояса (районы II-1, 2, 3, 5, 6) величина положительного тренда температуры воздуха изменяется от 0,02 до 0,033 °С/год. Наименьший тренд – 0,016 °С/год отмечается на востоке в Юкагиро-Аньюйском районе (II-8), наибольший тренд – 0,04-0,06 °С/год очевидно характерен для горных районов (II-4, 7). Однако следует заметить, что тренд температуры воздуха в пределах выделенных горных территорий определялся по данным метеостанций, расположенных на плато или плоскогорьях (обычно вблизи хорошо выработанных долин рек) с абсолютными отметками 200-600 м. Возможно указанный тренд и следует относить именно к таким морфоструктурным элементам.

В бореальном поясе по климатическим условиям выделено пять районов. Они очень отличаются рельефом поверхности, что, как и предыдущем случае, существенно сказывается на формировании погоды. Наиболее обширный район (III-2), включающий Вилуйское и Приленское плато, имеет равнинный рельеф с абсолютными отметками поверхности 200-500 м (преимущественно). Под влиянием Центрально-Якутского антициклона климат отличается повышенной резкой континентальностью, наибольшей мощностью снежного покрова. Тренд температуры воздуха составляет здесь 0,02 - 0,033 °С/год. Более высокий тренд (0,037 - 0,04) получен для возвышенной части плато в Ангара-Ленском районе (III-1). Близким к этому району по значению тренда (0,034 - 0,046) относится горная территория, окаймляющая с юга Оймяконское нагорье (III-1). На остальной части Центральной и Южной Якутии (районы III-3,5), включающей Приленское плато и Алдано-Становую горную систему с Чульманской впадиной, получены максимальные значения положительного тренда температуры воздуха от 0,07 (по данным м.с. Якутск) до 0,088 °С/год (по данным м.с. Чульман).

Выводы

1. Прогноз динамики среднегодовой температуры воздуха показал, что за счет естественноисторических причин и антропогенных факторов на территории Европейского Севера России тренды повышения температуры воздуха незначительны. Тренд антропогенного повышения среднегодовой температуры воздуха ($0,001\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$) прогнозируется на южном острове архипелага Новая Земля. На остальной территории криолитозоны Европейского Севера значение антропогенного тренда изменяется незначительно и лежит в пределах от $0,005$ до $0,008\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

2. На территории Западной Сибири изменение среднегодовой температуры в будущем аналогичны выявленным тенденциям для Европейского Севера. В регионе можно выделить две обширные области, отличающиеся по значениям тренда повышения температуры воздуха. В первой области, тяготеющей к тундровой зоне, величина тренда изменяется от $0,003$ до $0,009\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (м.с. о.Белый, Харасавэй, Марре-Сале, Ныда, Гыдойма, Игарка). Вторая область, для которой величина антропогенного тренда температуры воздуха лежит в пределах $0,01 - 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, занимает территорию прерывистого, островного и редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород. Граница, разделяющая выделенные области, тяготеет к полярному кругу и приблизительно совпадает с северной границей лесотундровой зоны.

Южнее границы распространения многолетнемерзлых пород тренд антропогенного повышения среднегодовой температуры воздуха увеличивается.

3. Прогнозируемая тенденция динамики температур воздуха для районов Средней и Восточной Сибири отличается от выявленной для регионов Европейского Севера и Западной Сибири. Достаточно сложные природные условия территории, обусловленные климатической поясностью и морфоструктурными особенностями, определяют значительное разнообразие районов с различными трендами антропогенного повышения среднегодовой температуры воздуха. Тренды повышения среднегодовой температуры воздуха изменяются от $0,01 - 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ на севере территории до $0,045 - 0,088\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в южных районах.

Глава 4

Прогноз геокриологических условий территории Европейского Севера, Западной, Средней и Восточной Сибири

4.1. Методика прогноза*

В общем случае тепловое взаимодействие в системе «литосфера – атмосфера – космос» происходит за счет лучистого, кондуктивного и конвективного переноса тепла с фазовыми превращениями грунтовой влаги. Однако в такой постановке решение проблемы не существует. Все методы расчета, в том числе нормированные, изложенные в строительных Нормах и Правилах (СНиП 2.02.04-88), учитывают только кондуктивный механизм переноса тепла, который считается основным. При необходимости учета лучистого и конвективного переноса тепла прибегают к некоторым искусственным приемам, заключающимся в изменении определенным образом граничных условий или во введении соответствующих поправок в решение кондуктивной задачи. Итак, ведущую роль в решении тепловых задач в геокриологии играют задачи кондуктивного теплообмена.

Кондуктивный перенос тепла описывается эмпирическим законом Фурье, который устанавливает пропорциональную зависимость между плотностью теплового потока q и градиентом температуры T :

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T.$$

Коэффициент пропорциональности λ называется коэффициентом теплопроводности.

Из закона Фурье и закона сохранения энергии следует основное уравнение, описывающее процесс теплопроводности:

$$C \partial T / \partial t = \operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T),$$

где C – объемная теплоемкость, t – время.

Для обеспечения единственности решения уравнения теплопроводности необходимо задать начальные и граничные условия.

Начальные условия описывают температурное поле в некоторый момент времени, принимаемый за начало отсчета. Обычно начальные температуры определяются по данным изысканий.

Граничные условия описывают теплообмен рассматриваемой системы с внешней средой. В зависимости от температурного режима на границе различают три рода граничных условий.

* Раздел написан Г.П. Пустовойтом

Граничное условие I рода задает температуру на границе расчетной области как известную функцию времени и пространственных координат точек границы. Условие I рода описывает идеальный тепловой контакт грунта с внешней средой, когда сопротивлением теплообмену можно пренебречь.

Условие II рода задает тепловой поток, например, поступающий из недр Земли.

Граничным условием III рода описывается теплообмен по закону Ньютона, который устанавливает пропорциональность между разностью температур по разные стороны границы и плотностью теплового потока через нее. Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом теплообмена и может зависеть от координат и времени. Таким образом, граничное условие III рода содержит не одну, а две величины, которые задаются как заранее известные функции времени и участка границы.

В криолитозоне наиболее существенным процессом при тепловом взаимодействии сооружений с грунтами оснований является промерзание и оттаивание последних. При фазовых превращениях воды в лед и обратно теплопроводность, и теплоемкость грунта изменяются, поэтому уравнение теплопроводности записывается отдельно для талой и мерзлой зоны, получается система двух уравнений с двумя неизвестными температурами $T_1(x, y, z, \tau)$ в талой зоне и $T_2(x, y, z, \tau)$ – в мерзлой.

Положение границы раздела фаз также является неизвестной функцией времени, которая определяется из специфического условия, выражающего закон сохранения энергии при выделении (поглощении) скрытой теплоты фазового перехода и называемого условием Стефана. Условие для одномерного случая:

$$L_v \frac{\partial \xi}{\partial t} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\xi} - \lambda_1 \left. \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\xi},$$

где L_v – скрытая теплота фазового перехода на единицу объема, ξ – текущая координата границы раздела фаз, рассматриваемая как неизвестная функция времени t . Индексы 1 и 2 относятся к талой и мерзлой зоне, соответственно.

Задача о фазовых переходах в указанной постановке получила название задачи Стефана. Она относится к классу нелинейных задач, и не имеет не только точных, но и приближенных аналитических решений, за исключением простейших случаев. Поэтому используют численные решения уравнений на ЭВМ методом конечных разностей.

Метод конечных разностей состоит в том, что расчетная область покрывается прямоугольной сеткой, в узлах которой задаются теплофизические характеристики и определяются искомые температуры. При этом исходное дифференциальное уравнение в частных производных заменяется

конечно-разностным сеточным уравнением. Например, для одномерного случая можно записать для i -го узла сетки на j -м шаге во времени:

$$(T_i^{j+1} - T_i^j) / \tau = a (P-1) (T_i^{j+1} - 2 T_i^j - T_i^{j-1}) / h^2 + a P (T_{i-1}^j - 2 T_i^j - T_{i+1}^j) / h^2 ,$$

где a – коэффициент температуропроводности; τ – шаг во времени; h – шаг сетки по пространственной координате; P – параметр, лежащий в диапазоне от 0 до 1.

В случае двух или трех измерений в правой части добавляются соответствующие разностные аналоги частных производных по y и z . Число таких уравнений равно числу узлов сетки, в которых определяются температуры.

При $P = 1$ расчетная схема называется явной, так как если имеется решение на j -м шаге во времени, то температура в каждом узле на $j + 1$ шаге явно выражается через уже известные температуры. Устойчивость явной схемы гарантирована, если

$$\tau \leq h^2 / (2a).$$

Следует обратить внимание на квадратичную зависимость: при сгущении сетки в 2 раза шаг во времени уменьшается в 4 раза и т.д. Следовательно, для получения достаточно точного решения приходится выбирать весьма малый шаг, а значит, требуется очень много таких шагов.

При $P < 1$ схема относится к классу неявных, поскольку неизвестные температуры уже нельзя явно выразить через известные – приходится решать систему уравнений. Неявные схемы абсолютно устойчивы, то есть сходятся при любом шаге во времени. Недостатком их является существенно большая сложность вычислений – необходимы эффективные и экономичные алгоритмы решения систем уравнений с матрицами специального вида.

При решении задач Стефана по неявной схеме появляются дополнительные трудности, связанные с фазовыми переходами. При большом шаге во времени фазовая граница может «проскочить» сразу несколько узлов сетки, что недопустимо, так как в узлах, изменивших свое фазовое состояние должны быть сразу же скорректированы теплофизические параметры. Таким образом, задачи Стефана целесообразно решать по явной схеме, тем более что в настоящее время известны весьма простые регуляризующие алгоритмы, которые позволяют в несколько раз увеличить шаг во времени без потери устойчивости схемы.

Еще одним преимуществом явной схемы является возможность представления и решения задачи Стефана в энтальпийной форме. Энтальпия интерпретируется как внутренняя энергия блока, и по ней однозначно восстанавливается как температура, так и относительная доля талой или

мерзлой фазы. Это упрощает алгоритм и экономит память, так как на каждом временном шаге нужно вычислять и хранить не две, а одну величину – энтальпию.

Основные особенности применяемого нами алгоритма конечно-разностного решения задач Стефана состоят в следующем: использована явная схема с регуляризацией, что позволяет в несколько раз увеличить шаг во времени (и сократить время счета); использована энтальпийная форма решения и метод балансов, что приводит к наглядной физической интерпретации результатов и существенно повышает точность определения положения границ промерзания-оттаивания.

Данный алгоритм реализуется компьютерной программой «Warm», разработанной на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ под руководством проф. Л.Н. Хрусталева (*Емельянов, Пустовойт, Хрусталев, Яковлев, 1994*).

4.2. Результаты прогноза

Расчеты динамики температурных полей пород для всех рассматриваемых регионов производились на ЭВМ по программе «Warm». Методика прогноза изложена в разделе 4.1.

Математическое моделирование осуществлялось для некоторых средних для территорий расположения метеостанций геокриологических разрезов. Обобщенные данные о мощности многолетнемерзлых пород (ММП), составе, их теплофизических свойствах и среднегодовой температуре для каждого района заимствовались из литературных источников (*Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов, 2002; Геокриологическая карта СССР, 1997; Геокриология СССР. Европейская территория СССР, 1988; Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток, 1989; Геокриология СССР. Средняя Сибирь, 1989 и др.*).

Задача ставилась как линейная. Размеры расчетной области по вертикали были выбраны в 1,1-2,0 раза больше мощности ММП. На нижней границе расчетной области задавалось граничное условие II-го рода с постоянным во времени значением теплопотока, соответствующего теплопотоку из недр земли в географической точке расположения метеостанции. Численные значения теплопотока указаны в колонке 3 в таблицах приложений 2, 4 и 6. В этих же таблицах, в колонках 1, 5, 6, 7, 8 и 9, дано описание разреза и теплофизические характеристики породы, а в колонке 4 указана начальная температура ММП на глубине нулевых годовых теплооборотов. Все эти данные были присвоены расчетным блокам, которые моделировали геокриологический разрез. На верхней границе расчетной области задавались граничные условия III-го рода с переменными во времени температурой воздуха и коэффициентом теплообмена, при этом изменения во времени были разделены на сезонные и годовые. Сезонные изменения

задавались в виде среднемесячных температур наружного воздуха осредненных за период наблюдений на метеостанции, предшествующий рубежному году. Годовые изменения – в виде среднегодовой температуры воздуха, вычисляемой по прогнозной формуле, полученной на основе ретроспективного анализа. Согласно методике к среднемесячной температуре воздуха ежегодно прибавлялась разность среднегодовых температур расчетного года и рубежного, т.е. вводилась поправка на потепление климата. Расчет проводился по десятилеткам, иными словами поправка на потепление усреднялась за 10 лет, что было связано с технологией моделирования.

Для коэффициента теплообмена (в нем учитывается снежный покров) задавались только сезонные изменения в виде среднемесячных значений коэффициента, усредненные за период наблюдений на метеостанции, предшествующий рубежному году. Таким образом, условно считалось, что количество осадков не связано с глобальным потеплением.

Кроме граничных условий для осуществления математического моделирования задавались начальные условия (начальное температурное поле пород). Методика назначения начальных условий для всех регионов была одинакова. Она предусматривала постановку специальной задачи, которая предшествовала основной задаче (прогноз температуры) и отличалась от нее только верхними граничными условиями. Последние принимались в виде постоянных значений среднемесячных температур наружного воздуха, осредненных за годы предшествующих рубежному. Начальными условиями для этой специальной задачи служило линейное распределение температуры пород в массиве, определяемое положением нижней границы ММП и температурой пород на глубине нулевых годовых теплооборотов, снимаемых с геокриологической карты. Процесс моделирования продолжался до установления квазистационарного температурного режима, на что требовался период времени 2000-3000 лет. При моделировании мы добивались совпадения температуры и мощности ММП с их величинами, указанными на геокриологической карте, для чего варьировалось значение термического сопротивления поверхности (в основном за счет растительности) и теплопотока из недр земли. Распределение температуры по глубине грунтового массива на 30 сентября при квазистационарном режиме принималось за начальное условие. Полученные из решения специальной задачи значения термического сопротивления поверхности и величины теплопотока вошли в граничные условия основной задачи.

Основная задача решалась начиная с рубежного года до 2030-60 гг. с записью результатов через каждые 10 лет.

Европейский Север России. Прогноз проводился для пяти пунктов, расположенных в криолитозоне Европейского Севера – Малые Кармакулы, Амдерма, Нарьян-Мар, Воркута и Канин Нос. Обобщенные данные о составе, теплофизических свойствах пород, их среднегодовой температуре, мощности многолетнемерзлых пород для каждого пункта приведены в

приложении 2. Численные значения верхних граничных условий по пяти районам показаны в приложении 3. Прогнозные значения изменения среднегодовой температуры пород и глубина их сезонного оттаивания приведены в таблице 4.1.

В связи с тем, что выявленные тренды повышения среднегодовой температуры воздуха в целом для территории криолитозоны Европейского Севера незначительны, многолетнего протаивания мерзлых пород к концу расчетного периода не отмечается. Происходит перестройка температурного поля пород по глубине.

В качестве примера на рис. 4.1, 4.2 показано распределение температуры пород по глубине для районов м.с. Нарьян-Мар, Воркута и Малые Кармакулы. Как видно из рисунков температурное поле пород носит существенно нестационарный характер. Это обусловлено влиянием естественной динамики верхних граничных условий – в нашем случае естественно-историческими изменениями среднегодовой температуры воздуха. Причем изменение температуры многолетнемерзлых пород отмечается до значительных глубин. Так для районов м.с. Нарьян-Мар и Воркута за счет естественной динамики температуры воздуха изменение температуры пород отмечается практически на всю мощность многолетнемерзлой толщи (рис. 4.1 – А и Б). Для района м.с. Малые Кармакулы, где мощность многолетнемерзлых пород составляет около 320 м., колебания температуры пород отмечаются до глубины 160 – 170 м. Деградационное распределение температур в интервале 20-60 м, полученное на основе прогноза к 2010 г по данным метеостанции Малые Кармакулы (рис. 4.1, С), достаточно хорошо совпадает с материалами натурных наблюдений 1998-1999 гг. в различных пунктах южного острова Новая Земля (*Пармузин и др. 2001*). Это еще раз подтверждает правомочность применяемой методики прогноза.

Следует отметить, что незначительные тренды повышения среднегодовой температуры воздуха в некоторые промежутки времени полностью компенсируются за счет наложения короткопериодных (8-10, 20-24 лет и др.) колебаний температуры воздуха, имеющих разные амплитуды и характеризующиеся определенным сдвигом фаз. Это можно наглядно посмотреть на рис. 4.2, где показана динамика температур пород на глубине, соответствующей глубине нулевых годовых амплитуд базового ряда среднегодовой температуры воздуха. Строго говоря, в условиях неустановившегося температурного режима, когда из года в год происходит изменение температурного состояния пород по глубине, не корректно говорить о среднегодовой температуре пород на глубине нулевых годовых амплитуд как о постоянной температуре в течение длительного отрезка времени. Поэтому для оценки тенденции изменения температурного состояния пород принята фиксированная глубина, приблизительно равная глубине нулевых годовых амплитуд в начальный момент времени – 12-25 м.

Таблица 4.1

Прогнозные климатические и геокриологические характеристики

м.с. Канин Нос					м.с. Амдерма				
Годы	Тв	T_0 $h_0=12,0$	$\xi_T = \xi_M$	Нммп	Годы	Тв	T_0 $h_0=25,0$	$\xi_T = \xi_M$	Нммп
до 1965	-0,77	-0,50	0,60	49,5	до 1968	-6,3	-4,18	0,15	224,7
1965-70	-1,76	-1,14	0,47	49,5	1968-70	-8,7	-4,72	0,09	224,7
1970-80	-0,96	-0,75	0,68	49,5	1970-80	-7,0	-4,77	0,11	224,7
1980-90	-0,78	-0,58	0,60	49,5	1980-90	-6,7	-4,64	0,10	224,7
1990-00	-0,91	-0,62	0,59	49,5	1990-00	-6,9	-4,63	0,11	224,7
2000-10	-0,74	-0,50	0,61	49,5	2000-10	-6,8	-4,61	0,13	224,7
2010-20	-0,49	-0,32	0,65	49,5	2010-20	-6,5	-4,53	0,10	224,7
2020-30	-0,74	-0,43	0,61	49,5	2020-30	-6,9	-4,56	0,11	224,7
2030-40	-1,19	-0,76	0,51	49,4	2030-40	-6,8	-4,57	0,15	224,7
2040-50	-0,65	-0,46	0,63	49,4	2040-50	-6,3	-4,45	0,13	224,7
2050-60	-0,72	-0,45	0,62	49,4	2050-60	-6,6	-4,43	0,11	224,7
м.с. Воркута					м.с. Нарьян-Мар				
Годы	Тв	T_0 $h_0=15,0$	$\xi_T = \xi_M$	Нммп	Годы	Тв	T_0 $h_0=17,0$	$\xi_T = \xi_M$	Нммп
до 1970	-5,8	-1,43	1,04	72,5	до 1974	-3,5	-1,26	0,80	100,00
1970-80	-6,2	-1,61	0,99	72,5	1974-80	-3,0	-1,12	0,92	100,00
1980-90	-6,0	-1,61	1,02	72,5	1980-90	-4,1	-1,65	0,71	100,00
1990-00	-6,0	-1,54	1,02	72,5	1990-00	-3,6	-1,54	0,80	100,00
2000-10	-5,7	-1,34	1,05	72,5	2000-10	-3,5	-1,46	0,81	100,00
2010-20	-5,9	-1,40	1,03	72,5	2010-20	-3,4	-1,38	0,83	99,96
2020-30	-5,8	-1,34	1,04	72,5	2020-30	-3,6	-1,47	0,80	99,88
2030-40	-5,6	-1,20	1,07	72,5	2030-40	-3,5	-1,44	0,82	99,82
2040-50	-5,4	-1,03	1,09	72,5	2040-50	-2,9	-1,07	0,94	99,76
2050-60	-5,3	-0,91	1,15	72,5	2050-60	-3,7	-1,41	0,78	99,70
м.с. Малые Кармакулы (о. Новая Земля)					Условные обозначения: до 1984 – все характеристики до рубежного года; 1980-90 – прогнозные значения за каждый 10-ти летний период: Тв – среднегодовая температура воздуха, °С; T₀ – среднегодовая температура пород на глубине (h₀) нулевых амплитуд, °С; ξ_T – максимальная глубина сезонного оттаивания пород на 1 октября (Канин Нос – на 1 ноября), м; ξ_M – максимальная глубина сезонного промерзания пород на 1 мая, м; Нммп – глубина залегания подошвы многолетнемерзлых пород, считая от дневной поверхности, м.				
Годы	Тв	T_0 $h_0=21,0$	$\xi_T = \xi_M$	Нммп					
до 1984	-5,1	-2,96	1,26	317,5					
1984-90	-5,2	-2,90	1,09	317,5					
1990-00	-3,1	-2,67	1,15	317,5					
2000-10	-4,5	-2,22	1,34	317,5					
2010-20	-4,7	-2,34	1,25	317,5					
2020-30	-7,3	-2,94	1,08	317,5					
2030-40	-7,3	-3,06	1,11	317,5					
2040-50	-5,1	-3,08	1,14	317,5					
2050-60	-4,9	-2,82	1,24	317,5					

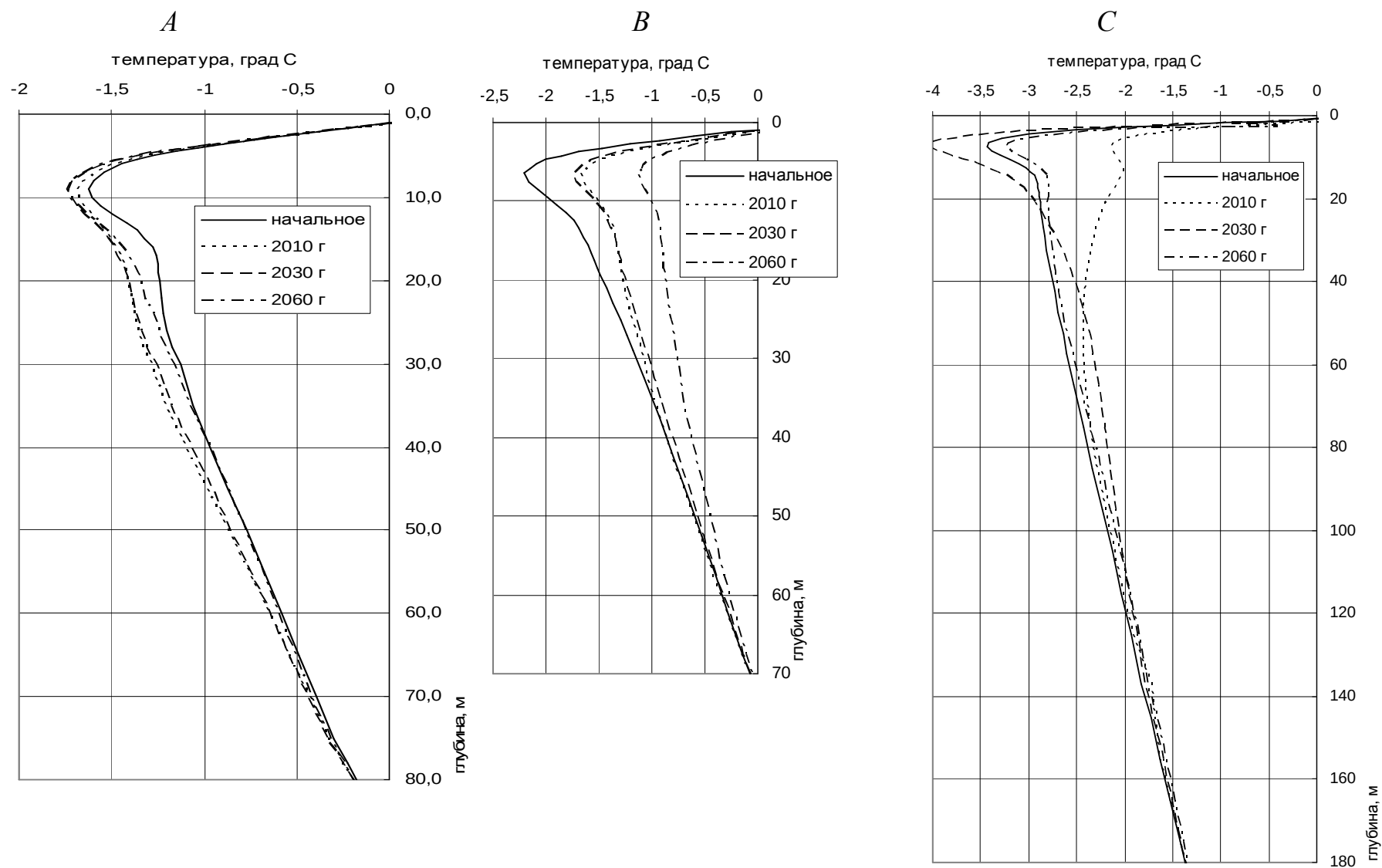


Рис. 4.1 Распределение температуры пород по глубине в районе м.с. Нарьян-Мар (А), Воркута (В) и Малые Кармакулы (С)

Как видно из рисунка 4.1, наибольшая изменчивость среднегодовой температуры пород характерна для района м.с. Малые Кармакулы, расположенной на побережье Баренцева моря. Это закономерно, поскольку для этого района значительная изменчивость среднегодовой температуры воздуха – среднее квадратическое отклонение температуры воздуха от нормы составляет $1,78^{\circ}\text{C}$. Для районов м.с. Воркута и Нарьян Мар величина среднего квадратического отклонения колеблется в пределах $1,40 - 1,69^{\circ}\text{C}$. В связи с этим и изменчивость среднегодовой температуры меньшая. По метеостанции Малые Кармакулы к 2060 г не отмечается повышение температуры пород. Максимальные значения температуры пород прогнозируются в 2010-2020 гг., что связано с естественной динамикой климата. Для остальных пунктов отмечается некоторая тенденция повышения значений среднегодовой температуры пород к 2060 г., однако за счет естественной динамики климата в отдельные годы возможно как повышение, так и понижение температуры пород.

Западная Сибирь. Расчеты температурных полей пород производились на ЭВМ по программе «Warm» для семи районов, представленных метеостанциями: о. Белый, Марре-Сале, Туруханск, Надым, Салехард, Тарко-Сале, Полуй.

Обобщенные данные о составе, теплофизических свойствах пород, современному значению их среднегодовой температуры, мощности многолетнемерзлых пород для каждого пункта приведены в приложение 4. Численные значения верхних граничных условий по семи районам показаны в приложение 5. Прогнозные значения изменения среднегодовой температуры пород и глубина их сезонного и многолетнего оттаивания приведены в таблице 4.2. Прогноз производился начиная с рубежного года до 2060 г. с записью результатов через каждые 10 лет (табл. 4.2) Из анализа табл. 4.2 следует, что во всех районах происходит деградация ММП, интенсивность которой возрастает с севера на юг и с запада на восток. Деградация выражается в повышении температуры на глубине ее нулевых годовых амплитуд и в сокращении мощности ММП за счет опускания ее верхней границы. Последнее имеет место в пяти случаях из семи. За время моделирования температура ММП на глубине ее нулевых годовых амплитуд повышается в районе о. Белый (широта 73° , долгота $71,5^{\circ}$) на $0,2^{\circ}\text{C}$; в районе Марре-Сале (широта $69,5^{\circ}$, долгота 66°) – на $0,3^{\circ}\text{C}$; в районе Салехарда (широта $66,5^{\circ}$, долгота $66,5^{\circ}$) – на $1,9^{\circ}\text{C}$. Начиная с 2070 г. наблюдается отрыв сезонного промерзания от многолетнемерзлой толщи, после которого интенсивность повышения температуры возрастает: в районе Туруханска (широта $65,8^{\circ}$, долгота $87,9^{\circ}$) – на $0,4^{\circ}\text{C}$, здесь отрыв сезонного промерзания от многолетнемерзлой толщи происходит после 2060 г.; в районе Надыма (широта $65,0^{\circ}$, долгота $73,0^{\circ}$) – на $1,6^{\circ}\text{C}$, здесь отрыв сезонного промерзания от многолетнемерзлой толщи происходит после 2030 г.; в районе

Тарко-Сале (широта $64,9^0$, долгота $7,8^0$) – на $0,5^0\text{C}$, здесь отрыв сезонного промерзания от многолетнемерзлой толщи происходит после 2010 г.

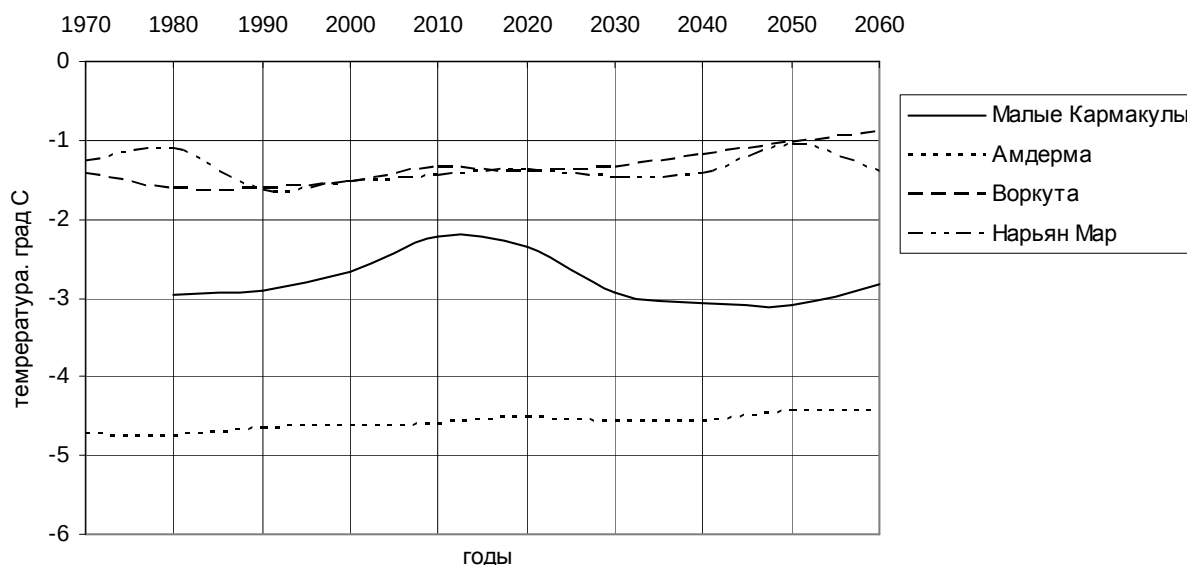


Рис. 4.2 Динамика температуры пород на глубине нулевых годовых амплитуд по районам м.с. Малые Кармакулы, Амдерма, Воркута, Нарьян-Мар

В районе Полуя (широта $64,0^0$, долгота $67,0^0$) повышение температуры пород – на $0,6^0\text{C}$, здесь отрыв сезонного промерзания от многолетнемерзлой толщи происходит после 2030 г. Кривые на рис. 4.3 – 4.7 иллюстрируют динамику многолетнего оттаивания пород с поверхности на примере разрезов в районах метеостанций Надым, Полуй, Тарко-Сале, Туруханск, Салехард. Сокращение мощности ММП происходит в результате опускания их верхней границы и очень незначительного подъема нижней (Тарко-Сале, Надым, Полуй). Причем опускание верхней границы ММП под действием глобального повышения средней годовой температуры воздуха происходит со средней интенсивностью от 2,5 до 8,3 см/год; а подъем нижней границы ММП под действием теплопотока из недр земли – не превышает 0,1 см/год. Опускание верхней границы ММП, которому, как мы видим, принадлежит главная роль в сокращении мощности ММП, происходит за счет трансформации сезонного оттаивания в многолетнее. Оно начинается с момента времени, когда сумма градусочасов температуры поверхности грунта в летний период становится больше абсолютного значения суммы градусочасов в зимний и во второй половине лета импульс тепла поступает к верхней границе ММП, вызывая оттаивание мерзлых пород.

Таблица 4.2

Прогнозные климатические и геокриологические характеристики

м.с. о.Белый					м.с. Салехард				
Годы	Тв	Т _о , h ₀ =23,5	$\xi_T = \xi_M$	Нммп	Годы	Тв	Т _о , h ₀ =14,5	ξ_T / ξ_M	Нммп
до 1976	-10,2	-8,61	0,20	300 0	до 1979	-6,5	-2,02	0,78/ 0,78	175,07
1976-80	-10,0	-8,56	0,23	300,0	1979-80	-6,2	-2,00	0,82/ 0,82	175,07
1980-90	-10,7	-8,75	0,16	300 0	1980-90	-5,9	-1,47	0,85/ 0,85	175,07
1990-00	-10,6	-8,80	0,17	300,0	1990-00	-5,8	-1,40	0,86/ 0,86	175,07
2000-10	-10,6	-8,83	0,17	300 0	2000-10	-5,4	-1,07	0,91/ 0,91	175,07
2010-20	-10,3	-8,75	0,20	300,0	2010-20	-6,2	-1,46	0,82/ 0,82	175,07
2020-30	-10,1	-8,68	0,17	300 0	2020-30	-5,2	-0,91	0,93/ 0,93	175,07
2030-40	-10,0	-8,57	0,20	300,0	2030-40	-4,5	-0,47	1,28/ 0,97	175,07
2040-50	-10,5	-8,68	0,18	300 0	2040-50	-5,0	-0,34	1,24/ 1,16	175,07
2050-60	-10,5	-8,66	0,20	300,0	2050-60	-5,2	-0,48	0,94/ 0,94	175,06
м.с. Надым					м.с. Тарко-Сале				
Годы	Тв	Т _о , h ₀ =16,5	ξ_T / ξ_M	Нммп	Годы	Тв	Т _о , h ₀ =14,5	ξ_T / ξ_M	Нммп
до 1972	-6,6	-1,64	0,51/ 0,51	90,71	до 1975	-6,5	-0,51	0,93/ 0,93	42,0
1972-80	-6,0	-1,36	0,55/ 0,55	90,72	1975-80	-5,9	-0,31	0,99/ 0,99	42,0
1980-90	-5,2	-0,73	0,62/ 0,62	90,72	1980-90	-5,9	-0,19	0,98/ 0,98	41,96
1990-00	-5,3	-0,55	0,61/ 0,61	90,71	1990-00	-5,8	-0,07	1,00/ 1,00	41,89
2000-10	-5,3	-0,47	0,61/ 0,61	90,67	2000-10	-5,4	-0,10	1,57/ 1,00	41,80
2010-20	-5,6	-0,63	0,58/ 0,58	90,61	2010-20	-5,2	-0,00	1,91/ 0,91	41,70
2020-30	-4,7	-0,24	0,75/ 0,68	90,53	2020-30	-4,9	0,00	2,61/ 0,94	41,59
2030-40	-4,0	-0,13	1,40/ 0,60	90,44	2030-40	-4,6	0,00	3,34/ 0,91	41,48
2040-50	-4,8	-0,08	1,40/ 0,65	90,34	2040-50	-4,4	0,00	4,10/ 0,87	41,37
2050-60	-4,9	-0,05	1,40/ 0,70	90,23	2050-60	-3,9	0,00	4,92/ 0,83	41,26
м.с. Марре-Сале					м.с. Полу́й				
Годы	Тв	Т _о , h ₀ =15,5	ξ_T / ξ_M	Нммп	Годы	Тв	Т _о , h ₀ =15,5	ξ_T / ξ_M	Нммп
до 1971	-8,3	-6,8	1,2	250,0	до 1971	-6,2	-0,56	0,58/ 0,58	50,00
1971-80	-9,5	-7,7	0,7	250,0	1971-80	-6,3	-0,62	0,57/ 0,57	50,00
1980-90	-8,2	-6,9	1,1	250,0	1980-90	-5,1	-0,20	0,84/ 0,61	50,00
1990-00	-6,8	-5,8	1,3	250,0	1990-00	-5,6	-0,08	1,00/ 0,77	49,96
2000-10	-8,1	-6,6	1,1	250,0	2000-10	-5,5	-0,03	1,00/ 0,80	49,90
2010-20	-9,1	-7,2	1,1	250,0	2010-20	-5,9	-0,21	0,59/ 0,59	49,83
2020-30	-10,0	-7,8	0,7	250,0	2020-30	-4,9	-0,06	0,96/ 0,60	49,77
2030-40	-9,3	-5,9	1,3	250,0	2030-40	-4,6	-0,02	1,47/ 0,58	49,71
2040-50	-6,7	-5,5	1,3	250,0	2040-50	-5,2	-0,01	1,80/ 0,61	49,61
2050-60	-6,5	-6,6	1,1	250,0	2050-60	-5,1	0,00	1,85/ 0,60	49,57
м.с. Туруханск					Условные обозначения: до 1961 – все характеристики до рубежного года; 1970-80 – прогнозные значения за каждый 10-ти летний период: Тв – среднегодовая температура воздуха, °С; Т_о – среднегодовая температура породы на глубине (h₀) нулевых амплитуд, °С; ξ_T – максимальная глубина сезонного оттаивания породы (для о. Белый на 1 сентября – для остальных пунктов на 1октября), м; ξ_M – максимальная глубина сезонного промерзания породы на 1 мая, м; Нммп – глубина залегания подошвы многолетне-мерзлых пород, считая от дневной поверхности, м.				
Годы	Тв	Т _о , h ₀ =17,5	ξ_T / ξ_M	Нммп					
до 1961	-6,8	-0,52	1,30/ 1,30	56,50					
1961-70	-6,9	-0,49	1,28/ 1,28	56,50					
1970-80	-7,5	-0,39	1,12/ 1,12	56,50					
1980-90	-6,4	-0,45	1,25/ 1,25	56,50					
1990-00	-6,3	-0,43	1,27/ 1,23	56,50					
2000-10	-6,6	-0,38	1,24/ 1,24	56,50					
2010-20	-6,3	-0,43	1,27/ 1,23	56,50					
2020-30	-5,7	-0,35	1,36/ 1,36	56,50					
2030-40	-6,0	-0,28	1,36/ 1,36	56,50					
2040-50	-5,5	-0,22	1,49/ 1,35	56,50					
2050-60	-4,8	-0,18	1,78/ 1,30	56,50					

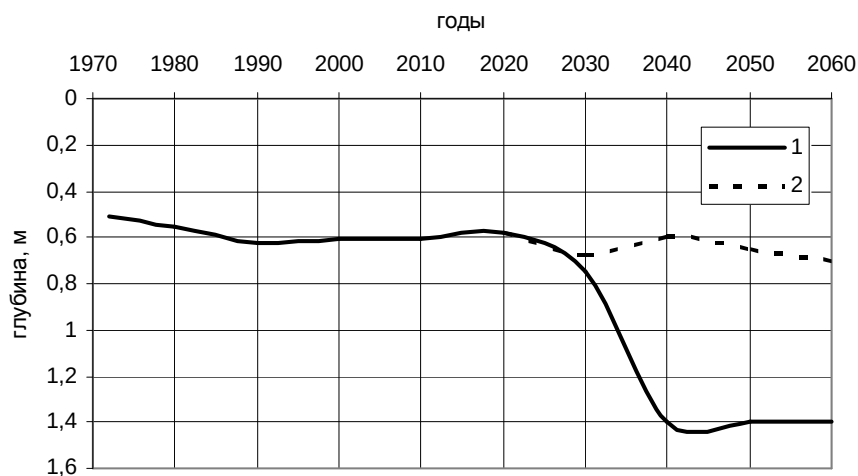


Рис. 4.3 Изменение глубин сезонного и многолетнего оттаивания (1) и сезонного промерзания пород (2). Район м.с. Надым

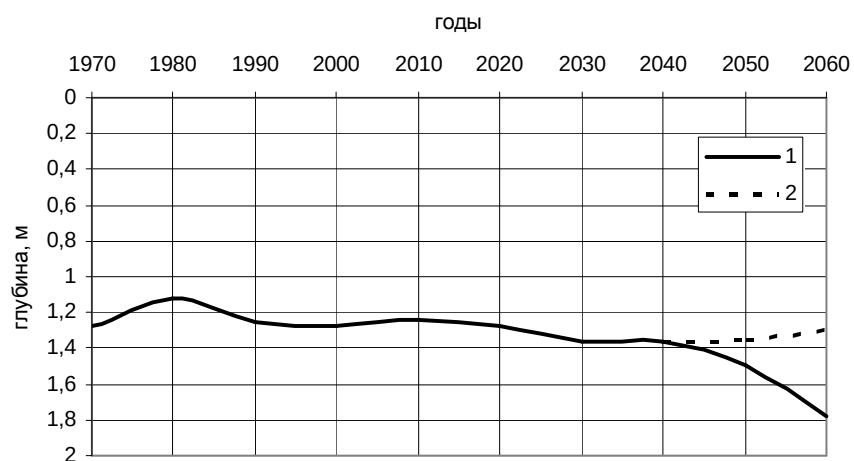


Рис. 4.4 Изменение глубин сезонного и многолетнего оттаивания (1) и сезонного промерзания пород (2). Район м.с. Туруханск

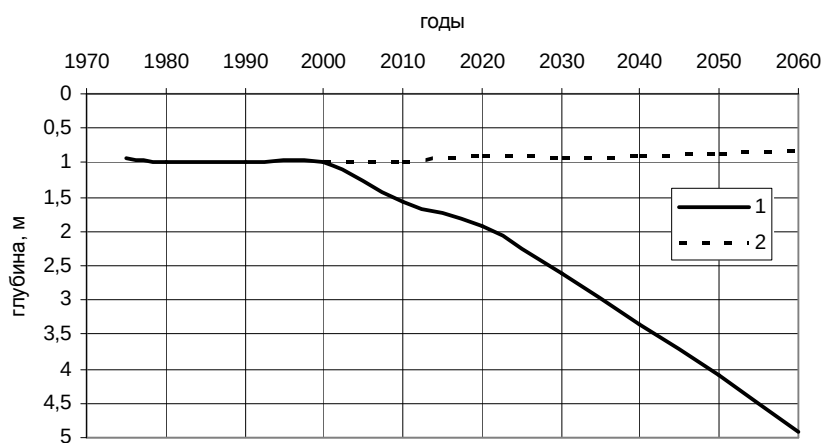


Рис. 4.5 Изменение глубин сезонного и многолетнего оттаивания (1) и сезонного промерзания пород (2). Район м.с. Тарко-Сале

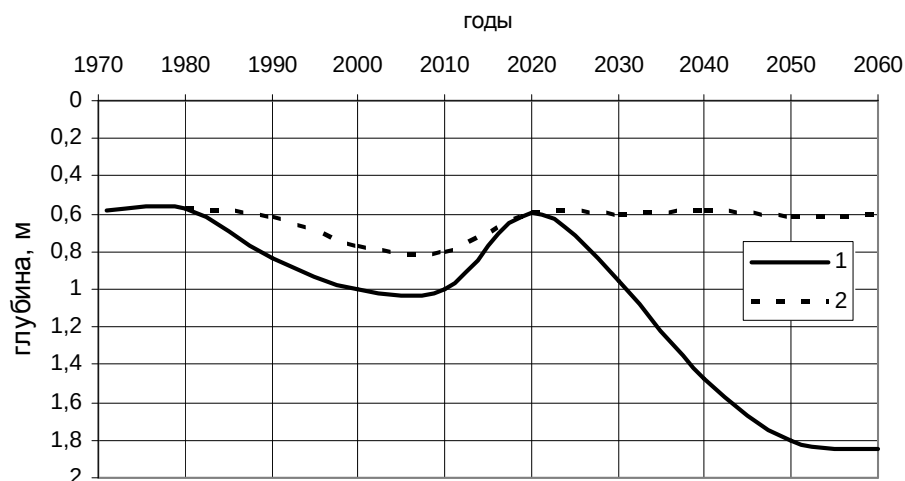


Рис. 4.6 Изменение глубин сезонного и многолетнего оттаивания (1) и сезонного промерзания пород (2). Район м.с. Полуй

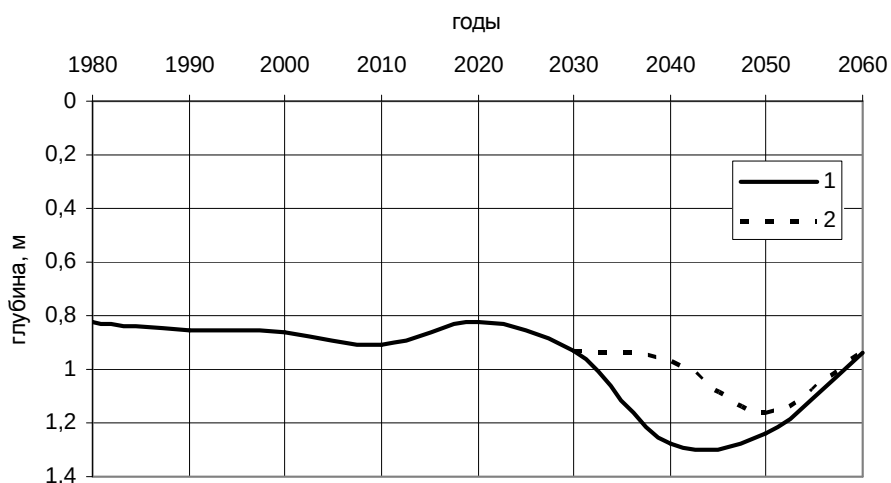


Рис. 4.7 Изменение глубин сезонного и многолетнего оттаивания (1) и сезонного промерзания пород (2). Район м.с. Салехард

Средняя и Восточная Сибирь. Расчеты температурных полей пород производились на ЭВМ по программе «WARM» для одиннадцати районов, представленных метеостанциями: Тикси, Якутск, Чульман, Туой-Хая, Мирный, Витим, Усть-Мая, Чокурдах, Верхоянск, Оймякон и Саскылах.

Обобщенные данные о составе, теплофизических свойствах породы, современному значению их среднегодовой температуры, мощности многолетнемерзлых пород для каждого пункта приведены в приложении 6.

Численные значения верхних граничных условий по одиннадцати районам показаны в приложении 7. Прогнозные значения изменения среднегодовой температуры пород (T_o) и глубина их сезонного и многолетнего оттаивания ($\xi_{\text{с}}$, $\xi_{\text{м}}$) приведены в таблице 4.3.

Основная задача решалась начиная с рубежного года до 2060 г с записью результатов через каждые 10 лет (табл. 4.3). Из анализа данных таблицы 4.3 следует, что во всех районах происходит деградация ММП, ин-

тенсивность которой возрастает с севера на юг и с запада на восток. Дегра-
дация выражается в повышении температуры (T_o) на глубине ее нулевых
годовых амплитуд (8-11 м) и в сокращении мощности ММП (в основном за
счет опускания ее верхней границы). Повышение температуры имеет место
для всех метеостанций, но в восьми случаях (из одиннадцати) процесс идет
более интенсивно (повышение T_o от 1 до 3°). За время моделирования тем-
пература ММП на глубине ее нулевых годовых амплитуд повышается в
районе метеостанции Тикси (широта 71,7°, долгота 128,8°) на 1,3 °С; в рай-
оне метеостанции Витим (широта 59,5°, долгота 112,6°) – на 1,7 °С; в рай-
оне метеостанции Верхоянск (широта 67,5°, долгота 133,4°) – на 1,1 °С; в
районе метеостанции Туой-Хая (широта 62,5°, долгота 111°) – на 2,5 °С,
причем, начиная с 2050 г. наблюдается отрыв сезонного промерзания от
многолетнемерзлой толщи, после которого интенсивность повышения
температуры увеличивается; в районе метеостанции Мирный (широта
62,5°, долгота 114°) – на 3,1 °С, здесь отрыв сезонного промерзания от мно-
голетнемерзлой толщи происходит после 2040 г.; в районе метеостанции
Якутск (широта 62,1°, долгота 129,8°) – на 3 °С, здесь отрыв сезонного
промерзания от многолетнемерзлой толщи происходит после 2030 г.; в
районе метеостанции Усть-Мая (широта 60,4 °, долгота 134,4°) – на 2,7 °С,
здесь отрыва сезонного промерзания от многолетнемерзлой толщи не на-
блюдается, однако происходит увеличение слоя сезонного оттаивания на
32 %; в районе метеостанции Чульман (широта 58,8°, долгота 124,9°) – на
2,1 °С, здесь отрыв сезонного промерзания от многолетнемерзлой толщи
происходит после 2010 г.

Кривые на рис. 4.9 иллюстрируют динамику температурного поля
породы под действием потепления на примере разреза в районе метеостан-
ции Тикси, а на рис. 4.10 – 4.13 – многолетнего оттаивания ММП с по-
верхности на примере разрезов в районе метеостанций Якутск, Чульман,
Мирный, Туой-Хая.

Как следует из таблицы 4.3, сокращение мощности ММП происхо-
дит в основном в результате опускания их верхней границы, а в районе ме-
теостанции Чульман еще и за счет подъема нижней. Причем опускание
верхней границы под действием повышения средней годовой температуры
воздуха происходит со средней интенсивностью от 0,7 до 50,0 см/год; а
подъем нижней границы под действием теплопотока из недр земли – от 0,5
до 9,0 см/год. Опускание верхней границы, которому, как мы видим, при-
надлежит главная роль в сокращении мощности ММП, происходит за счет
трансформации сезонного оттаивания в многолетнее (рис. 4.10 – 4.13). Оно
начинается с момента времени, когда сумма градусочасов температуры по-
верхности грунта в летний период становится больше абсолютного значе-
ния суммы градусочасов в зимний период, вызывая оттаивание мерзлых
пород.

Таблица 4.3

Прогнозные климатические и геофизиологические характеристики

м.с. Якутск					м.с. Чокурдах				
Годы	Тв	Т _о h ₀ =10,0	ξ_T/ξ_M	НММП	Годы	Тв	Т _о h ₀ =11,0	$\xi_T=\xi_M$	НММП
до 1977	-10,3	-3,00	2,20/2,20	300,00	до 1970	-13,9	-11,10	0,74	500,00
1977-80	-10,9	-3,14	2,14/2,14	300,00	1970-80	-13,5	-10,70	0,77	500,00
1980-90	-8,2	-2,52	2,33/2,33	299,85	1980-90	-13,9	-10,98	0,79	500,00
1990-00	-8,7	-1,91	2,46/2,46	299,71	1990-00	-13,4	-10,68	0,84	500,00
2000-10	-7,8	-1,05	2,62/2,62	299,64	2000-10	-13,5	-10,72	0,85	500,00
2010-20	-7,2	-0,49	2,73/2,73	299,57	2010-20	-13,0	-10,36	0,86	500,00
2020-30	-7,0	-0,29	2,76/2,41	299,50	2020-30	-13,2	-10,43	0,84	500,00
2030-40	-6,0	-0,19	4,20/2,55	299,41	2030-40	-13,1	-10,36	0,85	500,00
2040-50	-4,9	-0,11	6,30/2,76	299,33	2040-50	-13,3	-10,47	0,85	500,00
2050-60	-4,2	-0,05	8,48/2,14	299,26	2050-60	-13,6	-10,69	0,83	500,00
м.с. Чульман					м.с. Верхоянск				
Годы	Тв	Т _о h ₀ =8,25	ξ_T/ξ_M	НММП	Годы	Тв, °С	Т _о h ₀ =9,5	$\xi_T=\xi_M$	НММП
до 1964	-9,2	-2,10	1,70/1,70	130,00	до 1969	-15,6	-7,30	1,42	303,50
1964-70	-8,9	-2,07	1,86/1,86	129,90	1969-80	-15,3	-7,25	1,45	303,48
1970-80	-8,4	-2,00	2,09/2,09	129,30	1980-90	-14,6	-7,13	1,53	303,47
1980-90	-7,9	-1,65	2,03/2,03	128,70	1990-00	-14,4	-7,04	1,59	303,45
1990-00	-6,8	-0,82	2,24/2,24	128,10	2000-10	-14,2	-6,92	1,62	303,42
2000-10	-5,4	-0,20	3,30/2,33	127,50	2010-20	-14,0	-6,80	1,64	303,40
2010-20	-4,9	-0,09	4,96/2,46	126,80	2020-30	-13,8	-6,64	1,67	303,39
2020-30	-4,0	0,00	14,43/2,00	126,10	2030-40	-13,1	-6,61	1,69	303,36
2030-40	-3,8	0,00	19,48/1,90	125,30	2040-50	-13,0	-6,47	1,70	303,34
2040-50	-2,7	0,00	25,27/1,78	124,55	2050-60	-12,6	-6,20	1,78	303,33
2050-60	-1,2	0,00	32,62/1,58	123,13					
м.с. Мирный					м.с. Усть-Мая				
Годы	Тв	Т _о h ₀ =11,0	ξ_T/ξ_M	НММП	Годы	Тв, °С	Т _о h ₀ =9,5	$\xi_T=\xi_M$	НММП
до 1971	-7,8	-3,40	1,80/1,80	302,00	до 1973	-10,0	-4,00	1,60	187,00
1971-80	-8,1	-3,46	1,80/1,80	302,00	1973-80	-9,9	-3,59	1,67	186,92
1980-90	-7,4	-2,96	1,86/1,86	301,97	1980-90	-9,4	-3,20	1,71	186,90
1990-00	-6,4	-2,20	1,92/1,92	301,90	1990-00	-8,2	-2,89	1,80	186,88
2000-10	-6,3	-1,99	1,95/1,95	301,87	2000-10	-8,2	-2,76	1,86	186,81
2010-20	-6,1	-1,78	1,98/1,98	301,83	2010-20	-8,0	-2,56	1,92	186,74
2020-30	-5,9	-1,58	2,11/2,11	301,75	2020-30	-7,5	-2,21	2,05	186,67
2030-40	-5,1	-0,99	2,15/2,09	301,71	2030-40	-7,5	-2,19	2,11	186,61
2040-50	-4,6	-0,56	2,33/2,07	301,68	2040-50	-6,3	-1,34	2,13	186,55
2050-60	-4,0	-0,26	2,36/2,03	301,66	2050-60	-6,4	-1,28	2,18	186,48

продолжение таблицы 4.3

м.с. Витим					м.с. Оймякон				
Годы	Тв	Т _о h ₀ =10,5	ξ _т /ξ _м	Нммп	Годы	Тв	Т _о h ₀ = 11,0	ξ _т =ξ _м	Нммп
до 1971	-5,4	-1,80	2,00/2,00	90,00	до 1971	-16,5	-6,80	1,49	502,23
1971-80	-5,6	-1,81	2,00/ 2,00	90,00	1971-80	-16,5	-6,66	1,49	502,22
1980-90	-4,5	-1,15	2,27/ 2,27	89,84	1980-90	-16,1	-6,38	1,50	502,21
1990-00	-4,1	-0,86	2,33/ 2,33	89,65	1990-00	-16,3	-6,31	1,52	502,18
2000-10	-4,0	-0,63	2,52/ 2,52	89,32	2000-10	-16,2	-6,27	1,54	502,15
2010-20	-3,8	-0,27	2,67/ 2,67	89,15	2010-20	-16,0	-6,24	1,57	502,13
2020-30	-3,7	-0,10	2,78/2,55	88,92	2020-30	-15,7	-6,02	1,62	502,10
м.с. Тикси					м.с. Саскылах				
Годы	Тв	Т _о h ₀ = 10,0	ξ _т =ξ _м	Нммп	Годы	Тв	Т _о h ₀ =10,0	ξ _т =ξ _м	Нммп
до 1981	-13,1	-10,70	0,45	705,50	до 1981	-14,1	-8,30	0,79	694,00
1981-90	-12,0	-9,76	0,65	705,48	1981-90	-14,8	-8,21	0,82	693,98
1990-00	-11,6	-9,33	0,65	705,45	1990-00	-14,0	-8,12	0,84	693,97
2000-10	-11,6	-9,23	0,65	705,43	2000-10	-13,2	-7,95	0,87	693,93
2010-20	-11,5	-9,12	0,66	705,42	2010-20	-13,5	-7,83	0,89	693,91
2020-30	-11,5	-9,09	0,66	705,40	2020-30	-13,3	-7,68	0,91	693,88
2030-40	-11,5	-9,07	0,67	705,40	Условные обозначения: до 1964 – все характеристики до рубежного года; 1970-80 – прогнозные значения за каждый 10-ти летний период: Тв – среднегодовая температура воздуха , °С; Т _о – среднегодовая температура породы на глубине (h ₀) нулевых амплитуд, °С; ξ _т – максимальная глубина сезонного оттаивания породы на 1октября, м; ξ _м – максимальная глубина сезонного промерзания породы на 1 мая, м; Нммп – глубина залегания подошвы многолетнемерзлых пород, считая от дневной поверхности, м,				
2040-50	-11,6	-9,10	0,67	705,35					
2050-60	-11,9	-9,39	0,66	705,35					
м.с. Туой-Хая									
Годы	Тв	Т _о h ₀ =10,5	ξ _т /ξ _м	Нммп					
до 1964	-8,3	-2,80	1,70/1,70	219,95					
1964-70	-8,2	-2,69	1,72/1,72	219,88					
1970-80	-7,7	-2,36	1,90/1,90	219,84					
1980-90	-7,3	-1,95	1,95/1,95	219,81					
1990-00	-6,7	-1,54	1,98/1,98	219,78					
2000-10	-6,4	-1,25	2,11/2,11	219,65					
2010-20	-6,5	-1,18	2,14/2,14	219,60					
2020-30	-6,4	-1,13	2,16/2,16	219,57					
2030-40	-5,8	-0,90	2,19/2,19	219,55					
2040-50	-5,2	-0,73	2,33/2,10	219,48					
2050-60	-5,0	-0,32	2,77/2,05	219,43					

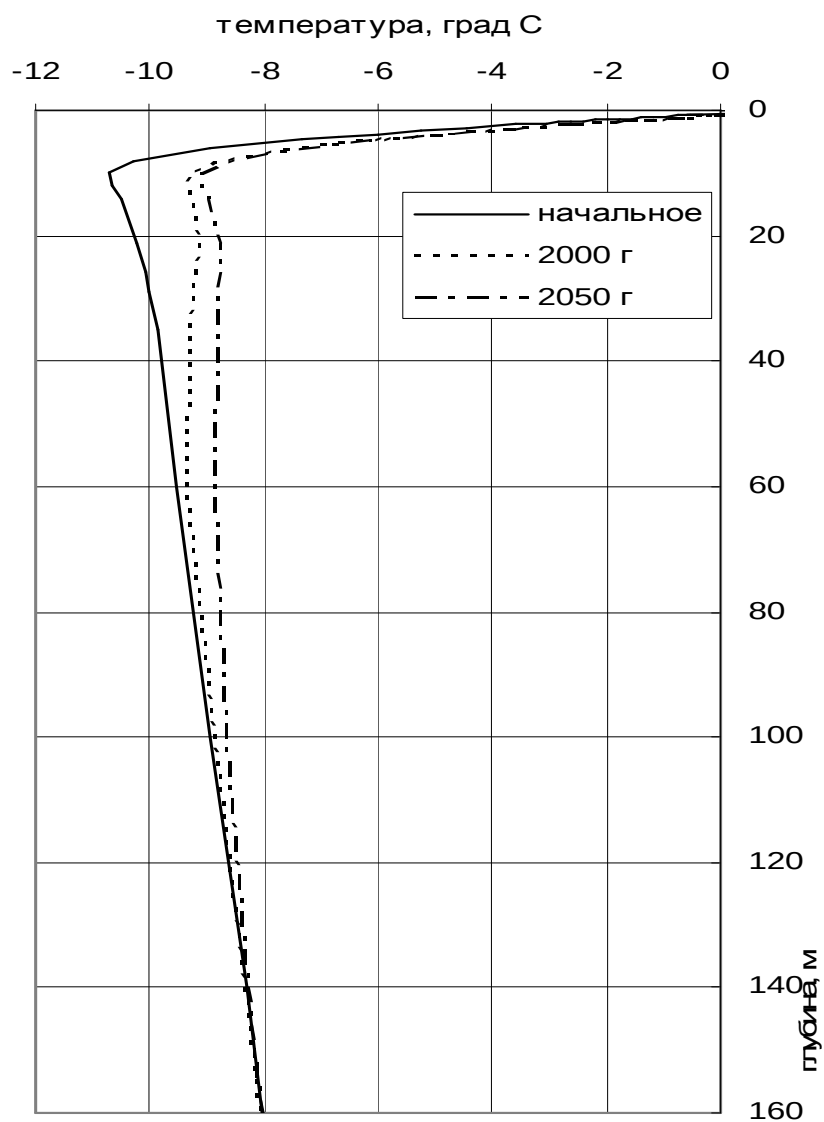


Рис. 4.9 Распределение температуры пород по глубине в районе м.с. Тикси

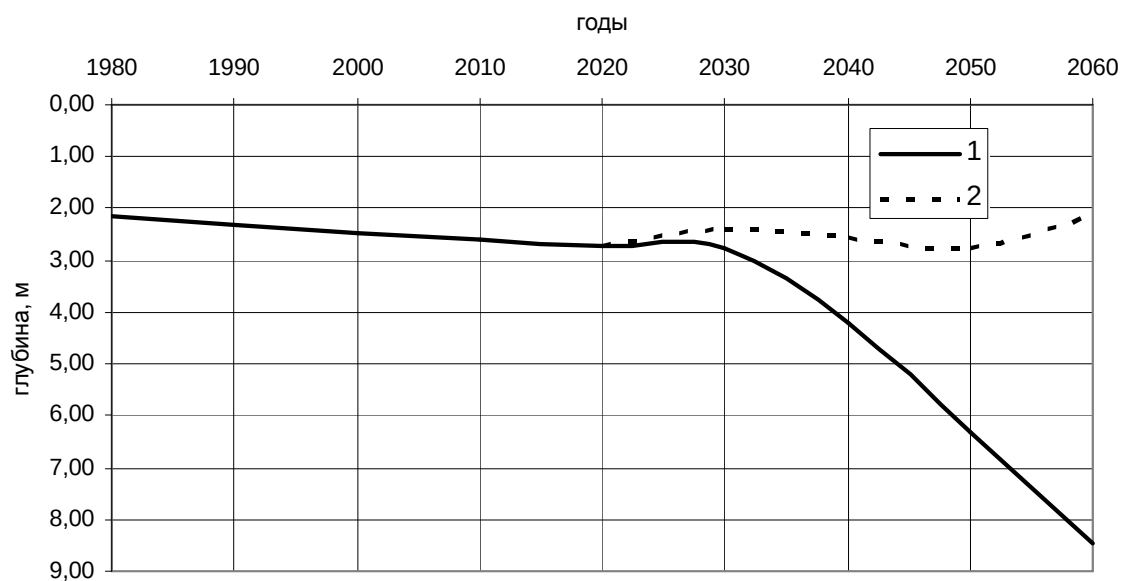


Рис. 4.10 Изменение глубины сезонного и многолетнего оттаивания (1) и сезонного промерзания пород (2). Район м.с. Якутск

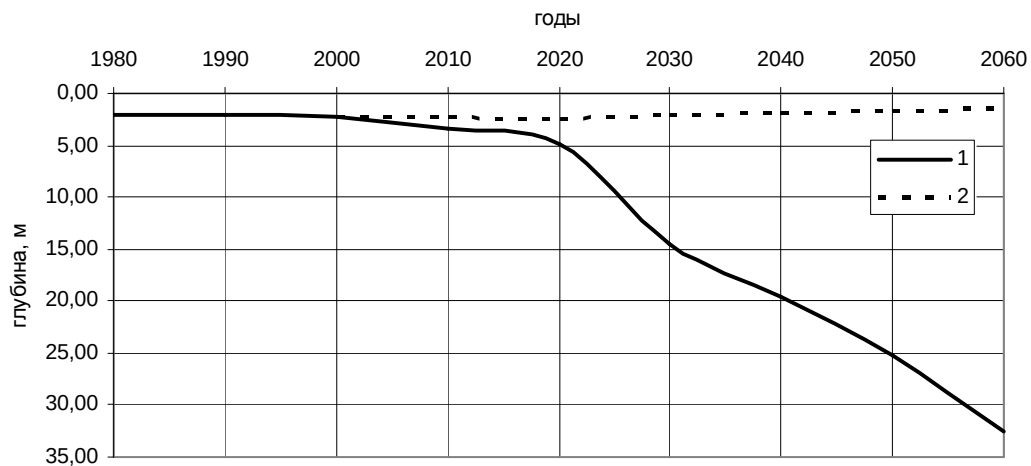


Рис. 4.11 Изменение глубины сезонного и многолетнего оттаивания (1) и сезонного промерзания пород (2). Район м.с. Чульман

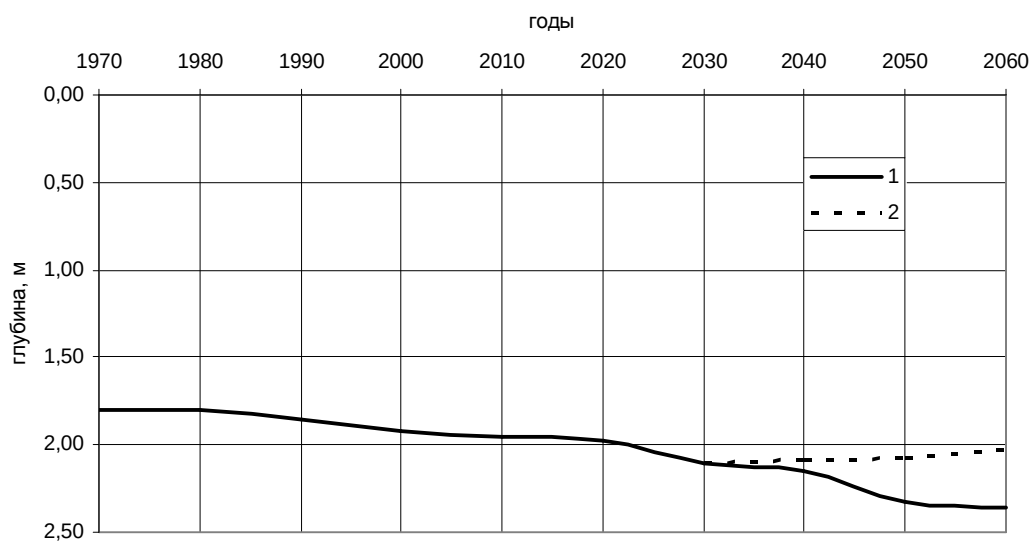


Рис. 4.12 Изменение глубины сезонного и многолетнего оттаивания (1) и сезонного промерзания пород (2). Район м.с. Мирный

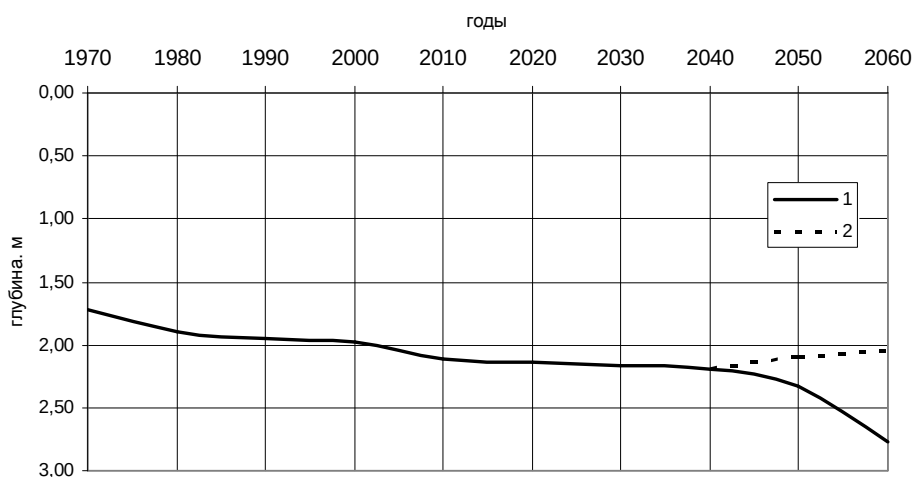


Рис. 4.13 Изменение глубины сезонного и многолетнего оттаивания (1) и сезонного промерзания пород (2). Район м.с. Туой-Хая

В результате оттаивания ММП сверху и снизу их мощность за период прогноза сократится больше всего в районе метеостанции Чульман – на 30 % и затем по мере убывания: в Якутске – на 2,4 %, Витиме – на 2,3 %, Туой-Хая – на 1,0 %, Мирном – на 0,3 %. В районе шести метеостанций – Тикси, Чокурдах, Верхоянск, Саскылах, Оймякон и Усть-Мая она останется практически неизменной.

4.3. Схематические прогнозные карты изменения среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород

На основе анализа современного состояния толщ многолетнемерзлых пород (раздел 2.2), выявленной динамики температурного режима воздуха в будущем с учетом антропогенных факторов (раздел 3.3) и прогноза изменения среднегодовых температур многолетнемерзлых пород (раздел 4.2) для территорий Западной, Средней и Восточной Сибири были составлены "Схематические прогнозные карты реакции многолетнемерзлых горных пород на изменения климата". Поскольку антропогенные тренды повышения среднегодовой температуры воздуха на территории **Европейского Севера России** незначительны (раздел 3.3), для этого региона составление прогнозной карты представляется нецелесообразным.

На схематической карте, составленной для территории **Западной Сибири** (рис. 4.14) выделено три обширные области, характеризующиеся существенно различной реакцией мерзлых пород на прогнозируемые изменения среднегодовой температуры воздуха.

Первая (северная) область, где современные значения среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород ниже $-3...-5^{\circ}\text{C}$. В этой области, учитывая незначительные значения антропогенного тренда повышения среднегодовой температуры воздуха (рис. 3.14), прогнозируемые к 2060 г. значения среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород не повысятся выше -3°C . Многолетнее оттаивание пород не происходит. Глубина сезонного оттаивания пород может увеличиться не более чем на 20 %. В естественных ландшафтах, не нарушенных техногенными воздействиями, возможна незначительная активизация термоэрозии, солифлюкции, морозного пучения грунтов.

Вторая область, где современные значения среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород составляют $-1...-3^{\circ}\text{C}$. В этой области к 2060 г. может произойти повышение среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород до нуля, однако многолетнего оттаивания здесь происходить не будет. Глубина сезонного оттаивания пород может увеличиться на 30-50 %.

Могут значительно активизироваться термоэрозия, солифлюкция, морозное пучение грунтов, возможно образование неглубоких термокарстовых просадок, морозобойное растрескивание затухает.

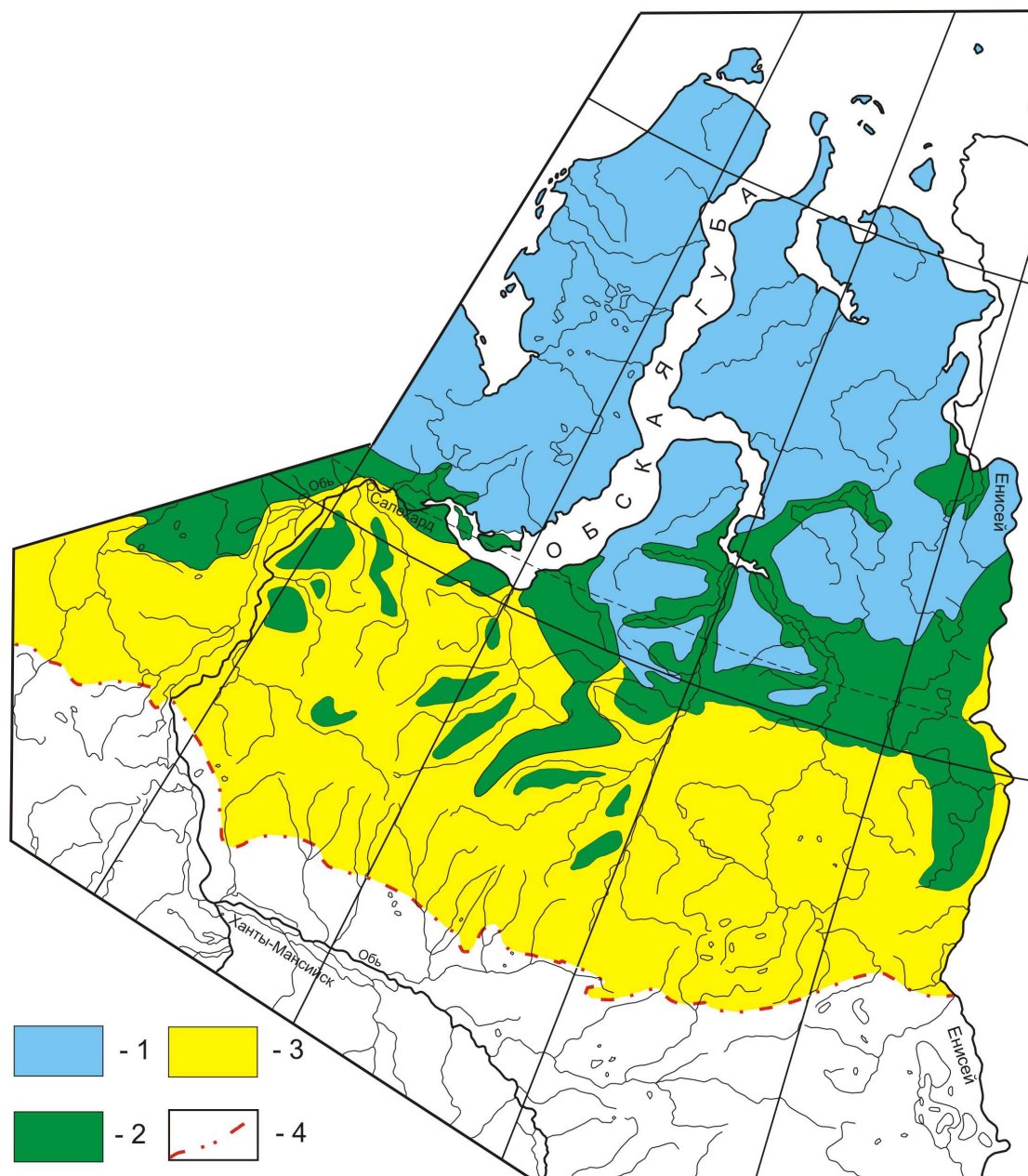


Рис. 4.14 Схематическая прогнозная карта реакции многолетнемерзлых горных пород на изменение климата в разных регионах севера Западной Сибири к 2060 г.:

- 1 – территории, где среднегодовая температура многолетнемерзлых пород не повысится выше -3°C , многолетнее оттаивания пород не происходит, глубина сезонного оттаивания может увеличиваться до 20 %;
- 2 – территории, где среднегодовая температура многолетнемерзлых пород не повысится выше 0°C , многолетнее оттаивание пород не происходит, глубина сезонного оттаивания в естественных ландшафтах увеличится на 30 - 50 %;
- 3 – территории, где среднегодовая температура вблизи кровли многолетнемерзлых пород становится положительной, глубина многолетнего оттаивания в зависимости от состава, свойств пород и тренда антропогенного повышения температуры воздуха составит 1,5- 4 м;
- 4 – южная граница распространения многолетнемерзлых пород

Третья область охватывает территории прерывистого, островного и редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород. Здесь к 2060 году среднегодовая температура вблизи кровли многолетнемерзлых пород становится положительной. Глубина многолетнего оттаивания в зависимости от состава, свойств пород и тренда антропогенного повышения температуры воздуха составит 1,5-4 м. В естественных ландшафтах могут значительно активизироваться и происходить новообразование процессов термоэрозии, солифлюкции; увеличится интенсивность морозного пучения; на участках развития сильнольдистых пород и повторно-жильных льдов – активное развитие получит процесс термокарста.

По особенностям реакции криолитозоны **Средней и Восточной Сибири** на повышение температуры воздуха (рис. 4.15), выделено пять групп районов, каждая из которых характеризуется определенными изменениями температурного режима и теплового состояния пород. Наиболее устойчивыми к потеплению климата являются районы, расположенные в арктике и субарктике, где среднегодовая температура горных пород имеет самые низкие значения (от -5 до -11°C) и где величина положительного тренда температуры воздуха минимальна ($0,01 - 0,02$ и $0,02 - 0,03^{\circ}\text{C}/\text{год}$).

Как показали результаты математического моделирования динамики температурного режима горных пород, процессов оттаивания-промерзания (раздел 4.2), в пределах всех районов, где среднегодовая температура пород в настоящее время изменяется от -3 до -5°C , многолетнее оттаивание мерзлых толщ до 2060 г. происходить не будет (рис 4.15). Влияние положительного тренда среднегодовой температуры воздуха здесь может сказаться на повышении T_0 на $1,5-2,0^{\circ}\text{C}$ и на увеличение мощности сезонного талого слоя на 20-50 %. Эти изменения могут вызвать активизацию термоденудации, термоэрозии, солифлюкции, увеличение интенсивности сезонного пучения пород. В отдельных случаях при неглубоком (менее 0,7 м) залегании льдонасыщенных пород может активизироваться термокарст. На тех участках, где T_0 будет повышаться вплоть до 0°C (см. рис. 4.15) все перечисленные процессы будут развиваться более активно (при соответствующих условиях), но морозобойное растрескивание мерзлых пород прекратится. На территориях, где в настоящее время среднегодовая температура многолетнемерзлых пород выше -3°C , потепление климата приведет к образованию несливающейся мерзлоты и к многолетнему протаиванию мерзлых толщ, кровля которых опустится к 2060 г. на глубину от 1,5-2,0 до 20-24 м (относительно современного положения). Изменение теплового состояния пород приведет не только к активизации наблюдаемых в настоящее время процессов, но и к оживлению экзогенных процессов, развитие которых в природных ландшафтах было "приостановлено" формированием многолетнемерзлых пород. Например, на Вилуйском плато может начать активно развиваться в карбонатных породах, залегающих вблизи.

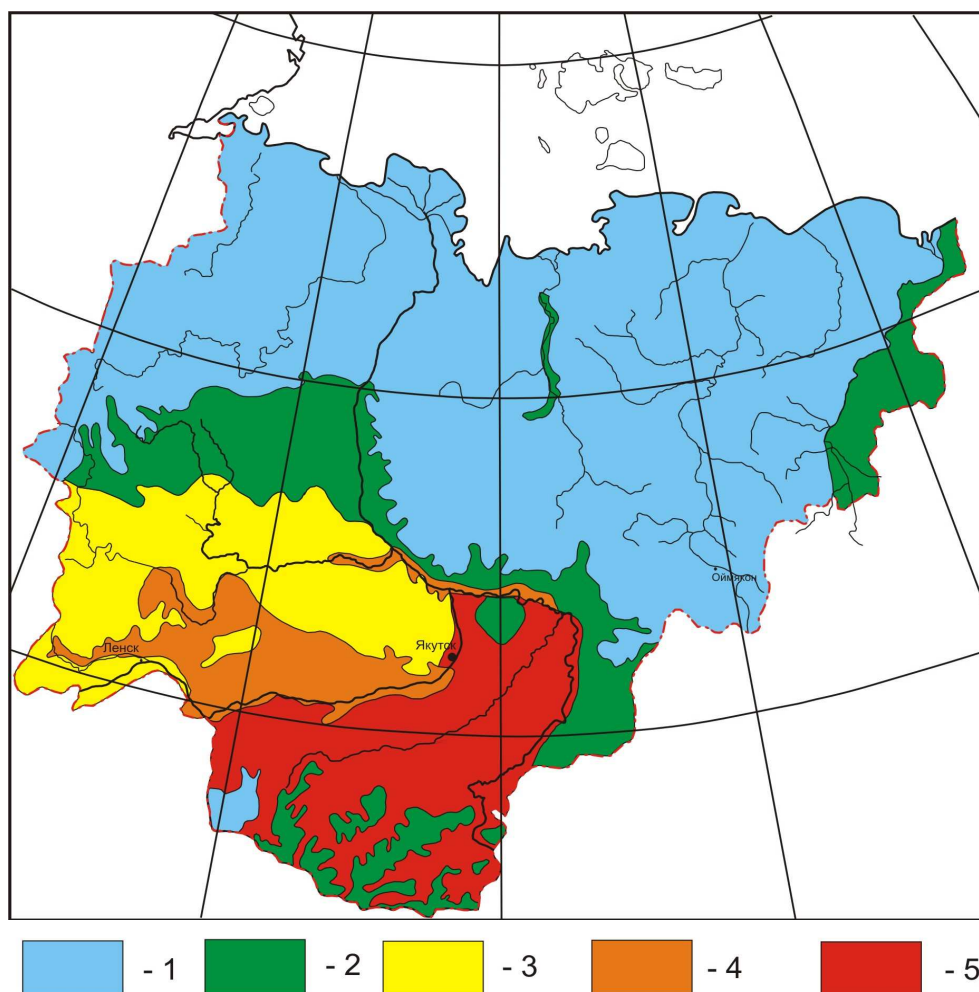


Рис. 4.15 Схематическая прогнозная карта реакции многолетнемерзлых горных пород на потепление климата в разных регионах Средней и Восточной Сибири к 2060 г.:

1 – территории, где среднегодовая температура многолетнемерзлых пород (T_0) не превысит -3°C , глубина сезонного оттаивания в естественных ландшафтах в среднем увеличится на 15-20 %, реже на 40-50 %;

2 – территории, где T_0 может приблизиться к 0°C , но многолетнее оттаивание пород не происходит, глубина сезонного оттаивания в естественных ландшафтах увеличится в среднем на 30-50 %;

3 – территории, где в период с 2030 по 2060 гг. T_0 вблизи кровли многолетнемерзлой толщи может превысить 0°C и произойдет образование несливающейся мерзлоты, мощность талого прослоя в среднем составит 0,2- 0,5 м, исключением являются участки, где современная T_0 пород ниже -2°C ;

4 – территории, где к 2060 г разобьение слоя зимнего промерзания произойдет повсеместно, а там, где T_0 пород превышает -1°C , может начаться (или уже идет) в настоящее время; в зависимости от начальной T_0 , состава и свойств пород глубина многолетнего оттаивания может составить 2-10 и более м.;

5 – территории, где в период 2010 – 2030 гг. повсеместно произойдет разобьение слоя зимнего промерзания пород с кровлей многолетнемерзлой толщи, которая в зависимости от начальной T_0 , состава, свойств пород и величины положительного тренда температуры воздуха опустится на глубину от 3,5-2,4 м от своего начального положения (см. раздел 2.2)

поверхности, карст, который был "законсервирован" промерзанием этих пород. Многолетнее оттаивание в условиях избыточного увлажнения может сопровождаться интенсивным пучением пород в зимнее время, а при наличии льдонасыщенных отложений – образованием термокарстовых понижений и заболачиванием поверхности. В горных районах неизбежна активизация склоновых процессов.

В заключение еще надо отметить, что наибольшей динамикой геокриологической обстановки, которая приведет к увеличению пространственной неоднородности и часто к повышению сложности инженерно-геокриологических условий, будут отличаться две группы районов:

1) в пределах Вилюйско-Ленского междуречья, где широко распространены высокотемпературные и поэтому неустойчивые толщи многолетнемерзлых пород;

2) в пределах Приленского плато и Алданского нагорья, где устанавливается максимальный положительный тренд среднегодовой температуры воздуха ($0,045 - 0,088$ °C/год), что становится главной причиной активизации криогенных процессов.

Выводы.

1. Повышение температуры воздуха приводит к повышению температуры пород, которое в разных регионах протекает с разной интенсивностью. По интенсивности изменения температуры пород регионы можно расположить в следующий возрастающий ряд Европейский Север – Западная Сибирь – Средняя и Восточная Сибирь.

2. На Европейском Севере отмечается лишь некоторая тенденция повышения среднегодовых температур пород к 2060 г., однако за счет естественной динамики климата в отдельные годы возможно как повышение, так и понижение температуры пород.

3. Во всех районах Западной, Средней и Восточной Сибири происходит деградация ММП, интенсивность которой возрастает с севера на юг и с запада на восток. Деградация выражается в повышении средней годовой температуры ММП, увеличении сезонного оттаивания и его трансформацию в многолетнее, в сокращении мощности мерзлых толщ.

Глава 5

Прогноз надежности геотехнических систем в области распространения многолетнемерзлых грунтов в условиях глобального изменения климата.

5.1. Принятая терминология

Под геотехнической системой понимается инженерное сооружение и взаимодействующая с ним геологическая среда (массив грунта, на который распространяется тепловое и механическое влияние инженерного сооружения, называемый основанием сооружения).

Под надежностью геотехнической системы понимается ее способность воспринимать всю совокупность внешних воздействий (природно-климатических и техногенных, тепловых и механических) в течение заданного срока с обеспечением нормальной эксплуатации (работоспособности) сооружения и размещенного в нем оборудования.

Надежность системы состоит из трех составляющих: безотказности системы, ее долговечности и ремонтпригодности.

Безотказность – свойство системы сохранять работоспособность в определенных условиях эксплуатации. Потеря работоспособности частичная или полная называется отказом.

Долговечность – свойство системы длительно сохранять работоспособность, с возможными перерывами на ремонт.

Ремонтпригодность – возможность восстанавливать работоспособность системы после отказа (ремонтировать систему). Среднее время между ремонтами называется временем наработки на отказ.

Геотехнические системы подразделяются на ремонтпригодные и неремонтпригодные. Неремонтпригодные системы, например, здания на оттаивающих основаниях, работают только до первого отказа и для них понятия надежности и безотказности совпадают, а долговечность измеряется временем наработки на отказ.

В целях упрощения стоящей перед нами задачи – прогноз надежности геотехнической системы и управление надежностью, систему следует разбить на две подсистемы (основание и сооружение) и далее оценить надежность каждой из них с последующей увязкой их между собой.

На современном этапе вопрос надежности многих сооружений можно считать решенным. Например, в нормативных документах для различных видов сооружений нормированы предельные величины деформаций основания, соответствующие пределу эксплуатационной пригодности конструкции.

Поэтому мы будем заниматься только одной подсистемой – основание. Для этой подсистемы величина предельной деформации другой подсистемы – сооружение принимается за постоянную величину.

Такой подход правомерен, так как дает некоторый запас в оценке надежности системы “основание – сооружение”, на что указывала И.В. Шитова (1980). Немаловажен и тот факт, что при этом сохраняется преемственность предлагаемого нами подхода по отношению к методике предельных состояний, заложенной в нормативные документы.

Основными факторами, определяющими надежность основания, являются:

- достоверность описания инженерно-геологических условий;
- достоверность определения грунтовых характеристик;
- достоверность информации о нагрузках и воздействиях на систему;
- качество проектных проработок и их реализации.

Количественное описание перечисленных факторов во всей сложности их взаимодействия во время работы системы должно производиться с учетом изменчивости как свойств грунтов основания, так и нагрузок и воздействий, которым эти грунты подвергаются при взаимодействии с сооружением.

Выявление закономерностей изменчивости свойств грунта, нагрузок и воздействий базируется на обобщении опытных данных методами математической статистики.

5.2. Физические предпосылки теории надежности грунтовых оснований

Особенности грунтов как материала основания.

Как известно, грунты подразделяются на два класса: скальные и нескальные. С точки зрения теории надежности нескальные грунты представляют наибольший интерес, к тому же наиболее существенные особенности нескальных грунтов (хотя в другой количественной мере) характерны также и для скальных грунтов. Учитывая это обстоятельство, дальнейшее изложение будем вести применительно к нескальным грунтам. Грунт как материал основания имеет нижеследующие важные для оценки надежности свойства:

1. Дискретность строения. В общем случае грунт состоит из различных по форме и размерам минеральных частиц, контактирующих между собой. Совокупность частиц с контактными связями между ними образует несущую систему грунта, определяющую их прочностные и деформационные свойства, распределенные в пространстве случайным образом.

2. Особый характер связей между частицами. Он заключается в наличии внутреннего трения и сцепления между частицами грунта, обуслов-

ливающих сопротивление грунтов сдвигу. Последнее определяется по формуле: $\tau = p \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$ (τ – сопротивление сдвигу; p – давление на грунт; φ – угол внутреннего трения; c – сцепление). Прочность связей между частицами в сотни и тысячи раз меньше прочности связей внутри частиц, поэтому первые целиком определяют прочность грунта. Прочность на растяжение много меньше прочности на сжатие.

3. Значительное по объему поровое пространство. Оно достигает 90% общего объема. Объем порового пространства характеризует степень разобщенности твердых частиц и наряду с прочностью межчастичных связей влияет на его прочностные и деформационные свойства. Количественными показателями разобщенности являются пористость грунта $n = V_{\text{пор}} / V_{\text{об}}$, коэффициент пористости $\varepsilon = V_{\text{пор}} / V_{\text{ск}}$ и плотность грунта $\rho = q_{\text{об}} / V_{\text{об}}$ ($V_{\text{пор}}$ – объем пор, $V_{\text{об}}$ – общий объем грунта, $V_{\text{ск}}$ – объем твердых частиц или объем скелета, $q_{\text{об}}$ – общий вес грунта).

4. Многофазность состава. Грунт состоит из минеральных частиц и находящихся в поровом пространстве воды, льда и газа. Твердые (минеральные) частицы, прочносвязанная вода и защемленные газы придают грунту свойства упругости, свободная вода, лед и свободные газы – свойства вязкости. В целом грунт представляет собой упруго-вязкопластичное тело, деформационные свойства которого зависят не только от прикладываемой к нему нагрузки и ее характера (статическая, динамическая), но и от длительности ее действия, особенно, если грунт находится в мерзлом состоянии.

5. Разнообразие состава и структуры. Важнейшими характеристиками структуры грунта являются: размеры, состав, форма и характер поверхности минеральных зерен; грансостав грунта; типы агрегатов; их пористость; прочность и влажностный режим. По А.К. Ларионову различают 4 класса структуры: раздельно-зернистая (частицы практически не связаны друг с другом силами сцепления); зернисто-пленочная (имеются связанные между собой агрегаты из минеральных зерен); агрегативная (минеральные зерна и агрегаты связаны в единую систему); слитная (сплошная, визуально однородная, агрегированная масса).

6. Неоднородность физико-механических свойств. Она находит свое выражение в следующем:

- а) в неравномерности распределения вещества в объеме грунта;
- б) в наличии дефектов структуры (прочности и деформируемости межагрегатных связей);
- в) в разбросе значений физических, прочностных и деформационных характеристик испытываемых образцов, взятых из одного и того же генетического слоя.

Изменчивость физико-механических свойств грунта.

Вследствие большой неоднородности грунтов отмечается значительная изменчивость в пространстве их физических, прочностных и деформационных свойств. В связи с этим Г.И. Покровским еще в 1937 г. было предложено использовать аппарат математической статистики для количественной оценки этой изменчивости. В качестве главного показателя изменчивости предлагалось принять коэффициент вариации $v_x = \sigma_x / m_x$ (σ_x – среднее квадратичное отклонение свойства x , для частной выборки – стандарт выборки; m_x – математическое ожидание свойства x , для частной выборки – среднее выборки).

Коэффициент вариации зависит от объема выборки (количества испытаний) и для известных грунтов находится в пределах, указанных в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Коэффициент вариации талых грунтов, %

Характеристика грунтов	Песок	Супесь	Суглинок	Глина
Влажность	30 - 50	10 - 30	8 - 28	4 - 25
Коэффициент пористости	3 - 13	6 - 12	6 - 25	3 - 22
Плотность	2 - 7,5	2 - 4,5	2,5 - 7,5	2 - 6
Число пластичности	-	25 - 50	5 - 35	7 - 30
Предел раскатывания	-	6 - 17	5 - 25	7 - 27
Предел текучести	-	5 - 16	5 - 20	5 - 20
Сопротивление сдвигу	-	9 - 27	6 - 29	-
Модуль общих деформаций	-	-	15 - 35	-

Изменчивость внешних воздействий на грунты основания.

Все внешние воздействия подразделяются на две группы: а) природно-климатические факторы; б) внешние нагрузки.

Воздействие природно-климатических факторов в основном сводится к влиянию воды и тепла, проникающих в основание в виде потоков массы (вода) и энергии (тепло).

Влияние воды сводится:

- к увеличению влажности грунта и, как следствие, снижению прочности и возрастанию сжимаемости;
- к взвешиванию водой минеральных частиц и их агрегатов, находящихся ниже уровня грунтовых вод;
- к дополнительному обжатию грунта силами капиллярного взвешивания при снижении уровня грунтовых вод.

Влияние тепла сводится:

- к снижению прочности и повышению деформационной способности мерзлых грунтов при повышении их температуры;
- к резкому снижению прочности и увеличению деформационной способности мерзлых грунтов при их оттаивании.

Особо следует подчеркнуть, что все свойства грунта, подверженные воздействию природно-климатических факторов и зависящие от них, изменяются во времени.

Воздействие внешних нагрузок подразделяется на воздействие постоянных нагрузок и временных. К постоянным нагрузкам относится собственный вес сооружения. К временным нагрузкам – длительные нагрузки (вес оборудования, нагрузки от работающего крана, вес снега), кратковременные нагрузки (ветровые нагрузки, вес транспорта, вес людей) и особые нагрузки (сейсмические, воздействие подземных выработок, карстовых просадок и просядков, связанных с замачиванием лессовых грунтов). В практике проектирования изменчивость внешних нагрузок учитывается коэффициентом перегрузки, который изменяется в интервале от 0,9 до 1,4.

Подводя итог сказанному, можно сделать следующие выводы:

- Результат каждого отдельного определения любой характеристики грунта является случайной величиной.
- Физико-технические свойства грунта и внешние воздействия на него могут быть охарактеризованы только совокупностью результатов многочисленных замеров исследуемого показателя или нагрузки.
- Область изменчивости физико-технических свойств грунта и величин внешних воздействий на основание столь велика, что ее исследование возможно лишь с позиций теории вероятностей и математической статистики.

5.3. Математическая формулировка задачи оценки надежности оснований инженерных сооружений и методы ее решения

Формулировка задачи

Напомним основные определения:

Функция надежности – вероятность нахождения системы в области допустимых состояний в течение отрезка времени от 0 до t , где t – текущее время. *Надежность* – то же самое в течении в течение всего срока эксплуатации t_3 . *Долговечность* – время пребывания системы в области допустимых состояний.

Их аналитические выражения запишутся:

$$\text{Функция надежности:} \quad P(t) = \left[\begin{array}{l} v_i(\tau) \leq v_{\text{lim},i}(\tau), i = 1, 2, \dots, n \\ 0 \leq \tau \leq t \end{array} \right], \quad (5.1)$$

где $P(t)$ – функция надежности,
 $\nu_i(\tau)$ – i -ая координата процесса в пространстве качества в
 момент времени τ ,
 $\nu_{\text{lim},i}(\tau)$ – i -ая координата границы области допустимых состояний
 в момент времени τ ,
 n – количество координат пространства качества,
 t – текущее время.

В квадратных скобках выражения (5.1) указаны условия, при которых не произойдет отказ системы. Их расшифровка для некоторых геотехнических систем дана в таблице 5.2, где $F_u(\tau), F(\tau), F_r(\tau), F_n(\tau), S(\tau)$ – соответственно, несущая способность основания, нагрузка на основание, сила защемления фундамента в грунте (сила трения или сдвига), действующая на фундамент касательная сила пучения и деформация основания на момент времени τ , s_u – предельно допустимая деформация основания.

Надежность основания есть значение функции (5.1) на конец периода эксплуатации системы t_g :

$$H = P(t_g), \quad (5.2)$$

Время наработки на отказ – случайная величина, условно подчиняющаяся нормальному закону распределения и характеризующаяся математическим ожиданием m_g и дисперсией D_g .

$$m_g = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (5.3)$$

$$D_g = 2 \int_0^{\infty} t P(t) dt - m_g^2, \quad (5.4)$$

Дополнение функции надежности до единицы равно вероятности появления отказа $Q(t) = 1 - P(t)$. Различают два вида отказа – внезапный и постепенный. Внезапный отказ связан с аномальными отклонениями внешних воздействий от своих номиналов (нормативных или расчетных значений). Постепенный – с ухудшением свойств системы со временем (старением системы).

Система называется стареющей, если выполняется неравенство:

$$\lambda(t_1) < \lambda(t_2), \quad \text{при } t_2 > t_1 \quad (5.5)$$

где $\lambda(t) = -\frac{P'(t)}{P(t)}$, ($P'(t)$ – первая производная функции надежности по времени t).

Таблица 5.2

Условия обеспечения надежности некоторых геотехнических систем

Система	Условие потери качества	Логическое соотношение	Обозначения
Здание – основание	По несущей способности основания	$F_u(\tau) > F(\tau)$	$F_u(\tau)$ – несущая способность основания на момент τ ; $F(\tau)$ – нагрузка на фундамент на момент τ .
	По осадкам основания и здания	$S(\tau) < S_u$	$S(\tau)$ – совместная деформация основания и здания на момент τ ; S_u – предельно допустимое значение деформации.
	По устойчивости фундамента к действию сил морозного пучения	$F_y(\tau) > F_n(\tau)$	$F_y(\tau)$ – силы, удерживающие фундамент от выпучивания, включая нагрузку на фундамент на момент τ ; $F_n(\tau)$ – силы морозного пучения, действующие на фундамент на момент τ .
Подземный трубопровод – грунт	По прочности материала трубы	$\sigma_n(\tau) < \sigma_{lim}$	$\sigma_n(\tau)$ – продольное напряжение в трубопроводе на момент τ ; σ_{lim} – предельное сопротивление металла.
	По устойчивости трубы в продольном направлении	$F_{gr}(\tau) < F_{lim}$	$F_{gr}(\tau)$ – продольное усилие сжатия на момент τ ; F_{lim} – предельное сопротивление трубы в продольном направлении.
	По устойчивости трубы на всплытие	$F_{akt}(\tau) < F_{nac}(\tau)$	$F_{akt}(\tau)$, $F_{nac}(\tau)$ – соответственно, выталкивающая и удерживающая сила на момент τ .
Дорога – основание, взлетнопосадочная полоса – основание	По несущей способности основания	$F_{ur}(\tau) > F_r(\tau)$	$F_{ur}(\tau)$, $F_r(\tau)$ – несущая способность основания дорожного покрытия и нагрузка, передаваемая на дорожное покрытие в момент τ
	По деформации основания	$S_r(\tau) < S_{ur}$	$S_r(\tau)$ – совместная деформация основания и дорожного покрытия на момент τ ; S_{ur} – предельное значение деформации

К стареющим системам относится основание здания, возведенного по принципу II, к нестареющим – по принципу I.

Любая стареющая система при бесконечно большом периоде эксплуатации уступает нестареющей. Однако при реальном периоде эксплуатации нельзя сделать столь однозначного вывода, ибо он будет зависеть от вида функции надежности. Этот вопрос мы подробно рассмотрим ниже, а сейчас перейдем к вопросу вычисления функции надежности.

Вычисление функции надежности складывается из трех этапов:

Первый – выбор пространства качества V , пространства входных параметров U и оператора системы L .

Второй – решение стохастического уравнения:

$$v = L \cdot u, \quad (5.6)$$

где v – элемент пространства V , u – элемент пространства U .

Третий – определение функции надежности как вероятности сохранения качества системы в течение отрезка времени от 0 до t , т.е. вероятности нахождения системы в области допустимых состояний в этот отрезок времени.

Под пространством U понимаются численные значения природных и техногенных факторов.

К числу природных факторов относятся:

температура наружного воздуха; скорость ветра; высота и плотность снега; глубина залегания многолетнемерзлых грунтов (ММГ); температура ММГ; геологическое строение основания, состав грунтов и их физико-механические свойства.

К числу техногенных факторов относятся:

конструкция сооружения, фундаментов и охлаждающей системы; условия работы охлаждающей системы; температура воздуха в помещениях первого этажа; глубина заложения подошвы фундаментов; глубина предпостроечной подготовки грунтов основания (искусственного оттаивания или промораживания). Последние два фактора особенно сильно влияют на надежность основания и с их помощью можно управлять надежностью, поэтому они называются управляющими параметрами.

К числу техногенных факторов относятся:

конструкция сооружения, фундаментов и охлаждающей системы; условия работы охлаждающей системы; температура воздуха в помещениях первого этажа; глубина заложения подошвы фундаментов; глубина предпостроечной подготовки грунтов основания (искусственного оттаивания или промораживания). Последние два фактора особенно сильно влияют на надежность основания и с их помощью можно управлять надежностью, поэтому они называются управляющими параметрами.

Под оператором L понимается алгоритм последовательного расчета: температуры поверхности грунта; температурного поля грунта основания;

несущей способности основания; касательных сил пучения и сил защемления фундамента в грунте; величины деформации основания.

Третий завершающий этап – определения функции надежности является самым сложным. Существуют два возможных пути его реализации – численный и аналитический.

Первый путь известный как метод Монте-Карло состоит в статистическом моделировании поведения системы в условиях случайных воздействий на нее и происходящих в ней случайных изменений. Для реализации его надо лишь построить детерминистическое описание преобразования элементов u в элементы v и повторить его m раз (несколько сотен а иногда и тысяч раз), фиксируя отказы системы в каждом испытании, если они будут иметь место. Функция надежности при этом определяется как дополнение до единицы частного от деления общего числа отказов за время t на общее число испытаний.

Положительной стороной метода Монте-Карло является его малая чувствительность к сложности системы, и он может быть реализован как в случае одномерного, так и в случае многомерного пространства качества. Отрицательной стороной – большая потребность машинного времени (метод реализуется на компьютерах) и сложность анализа полученных результатов.

Второй путь (аналитический) реализуется с привлечением известных в теории надежности моделей отказов и ряде существенных допущений, оценка погрешности которых все равно производится численным методом.

В качестве допущений принимаются следующие:

- 1) все стохастические параметры подчиняются нормальному закону распределения;
- 2) принцип I реализуется только на участке с ММГ сливающего типа, при этом считается, что условие $s \leq s_u$ заведомо обеспечивается, а вероятность выпучивания фундаментов равна нулю;
- 3) считается, что несущая способность основания сооружения, возводимого по принципу II, заведомо обеспечивается, а вероятность появления многолетнего промерзания и выпучивания фундаментов равна нулю.

Главная цель допущений – заменить многомерное пространство качества на одномерное. Далее рассматриваются две независимые задачи – обеспечение устойчивости сооружения на мерзлом основании и на оттаивающем. К первой задаче (принцип I) применяется Пуассоновская модель отказов, ко второй (принцип II) кумулятивная.

Положительной стороной аналитического метода является легкость анализа получаемого результата и возможность ручного счета. Отрицательной – невозможность расчета в случае многомерного пространства качества или большой сложности оператора L , а также большая погрешность вычислений из-за принятых допущений.

Как отмечалось выше, с помощью управляющих параметров можно направленно изменять надежность оснований. В связи с этим прогноз работоспособности основания приобретает активный характер: располагая аппаратом для расчета функции надежности, можно не только констатировать приемлемость проектного решения, но и изменять его по своему усмотрению, добиваясь оптимальной надежности.

Но какая должна быть оптимальная надежность?

С одной стороны, чем выше надежность, тем выше начальная стоимость системы C_0 , а с другой стороны, меньше материальный ущерб, обусловленный вероятностью отказа системы до окончания срока ее эксплуатации. Этот ущерб называется ценой риска C_R и зависит от функции надежности. Возникает оптимизационная задача, из решения которой находится оптимальная надежность:

$$C = C_0 + C_R \rightarrow \min. \quad (5.7)$$

Решение этой задачи мы рассмотрим в следующей главе.

5.4. Численный метод определения функции надежности

Численный метод заключается в многократном математическом моделировании процесса теплового и механического взаимодействия грунтового основания с инженерным сооружением и окружающей средой. По результатам моделирования строится статистическая оценка функции надежности:

$$P_m(t) = 1 - \frac{n(t)}{m}, \quad (5.8)$$

где $n(t)$ – число отказов в интервале от 0 до t , m – число моделирований (испытаний).

Число испытаний зависит от задаваемой погрешности вычислений и связано с ней выражением:

$$m = \frac{4P \cdot (1-P)}{\Delta^2}, \quad (5.9)$$

где Δ – задаваемая погрешность вычислений, P – искомая вероятность (надежность).

С целью сокращения объема вычислений мы приняли некоторое условие, по которому погрешность вычислений будет зависеть от результата вычислений, а именно, более высокой вероятности будет соответствовать и более низкая погрешность.

Это условие записывается в виде:

P	менее 0,5	от 0,5 до 0,95	более 0,95
Δ	$0,5 \cdot \delta$	$(1-P) \cdot \delta$	$\delta \cdot (0,05 \cdot (1-P))^{1/2}$

δ – параметр точности, для предварительных вычислений принимается равным 0,4, для окончательных – 0,8 и выше.

количество сделанных шагов соответствует продолжительности эксплуатационного периода, то опыт заканчивается и формируется новый опыт. Этот процесс осуществляет внешний по отношению к циклу по времени круговой цикл. Он формирует и подсчитывает число реализованных опытов и разыгрывает независимые от времени параметры для каждого нового опыта. Программа заканчивает работу, когда число опытов будет соответствовать задаваемой точности вычислений. Появление отказа не прерывает работу программы, а только свидетельствует о том, что опыт был неудачным и следует приступить к новому опыту, при этом в счетчик отказов поступает единица. После завершения циклических операций программа обрабатывает счетчик отказов и вычисляет функцию отказов, функцию надежности, цену риска и суммарную стоимость. На этом работа программы заканчивается. Весь процесс счета образно можно уподобить работе часов, где ядро – движение секундной стрелки, цикл по времени – минутной и цикл по опытам – часовой. Во внешнем цикле производится построение геологического разреза и розыгрыш характеристик грунта. Считается, что мощность литологических слоев и все численные значения грунтовых характеристик подчиняются равномерному закону распределения, поэтому их розыгрыш осуществляется с помощью псевдослучайного числа gav . Это число подчиняется равномерному закону распределения и вычисляется по специальной программе. Значение грунтовых характеристик и мощности слоя извлекают из выборки по номеру того образца, который совпадает с числом gav . На временном цикле производится розыгрыш параметров, зависящих от времени, например, температуры наружного воздуха. При этом математическое ожидание средней годовой температуры на каждом временном шаге вычисляется с учетом ее глобального изменения. Розыгрыш параметра осуществляют с помощью псевдослучайного числа $norm$, вычисляемому по специальной программе. Это число подчиняется нормальному закону распределения, имеет математическое ожидание, равное нулю, и дисперсию, равную единице. Значение разыгрываемого параметра получают по формуле: $u = M_u + norm \cdot \sigma_u$ (u – значение разыгрываемого параметра; M_u, σ_u – математическое ожидание параметра и его среднее квадратичное отклонение).

Внутренний цикл – ядро, зависит от типа геотехнической системы и условий потери ее качества (см. таб. 5.2). На кафедре геокриологии МГУ разработано три программы расчета надежности и приведенной суммарной стоимости (см. гл.6) для трех геотехнических систем: здание-основание (*программа NAST*, 1994), магистральный трубопровод – окружающая среда (*программа PIPE*) и взлетнопосадочная полоса – основание (*программа RW*, 1995). Все они построены по одному алгоритму и различаются только ядром.

В программе NAST внутренний цикл (ядро) осуществляет последовательные вычисления: расчетной температуры под зданием T_1 и вне зда-

ния T_2 , глубины промерзания-оттаивания под и вне здания, расчетной температуры грунтов, несущей способности основания и ее осадки, сил пучения и сил, защемляющих фундамент от выпучивания, проверяет предельные условия по несущей способности основания, пучению фундаментов и их осадке.

В программе PIPE внутренний цикл (ядро) осуществляет последовательные вычисления:

- для наземного трубопровода: те же, что и для фундамента здания при условии $T_1 = T_2$, но с учетом действия на фундамент опоры горизонтальной нагрузки;
- для наземного и подземного трубопровода: глубины оттаивания или промерзания грунтов под трубопроводом, величины перемещения трубы (осадка при оттаивании, пучение при промерзании), величины напряжения в трубе, проверяет предельные условия по прочности материала трубы, по устойчивости трубопровода в продольном направлении и на всплытие.

В программе RW внутренний цикл (ядро) осуществляет последовательные вычисления:

величины сезонного и многолетнего промерзания-оттаивания грунтов в основании взлетнопосадочной полосы, величины перемещения поверхности покрытия (осадка при оттаивании, пучение при промерзании), проверяет предельные условия по несущей способности основания и его деформации.

В приложении 8 в качестве примера приведена блок - схема одной из перечисленных программ – программы NAST (блок SAFETY). Ее алгоритм включает 22 оператора. Главными его функциональными операторами являются:

- оператор розыгрыша стохастических параметров, зависящих и независящих от времени;
- оператор вычисления температуры поверхности грунта под зданием и вне здания;
- оператор вычисления глубины промерзания и оттаивания грунта в основании здания;
- оператор вычисления несущей способности основания;
- оператор вычисления совместной деформации основания и здания;
- оператор вычисления действующих на фундамент касательных сил пучения и сил защемления фундамента в грунте.

На вход программы подается 40 детерминированных и $5+11 \cdot n$ (n – число литологических слоев в грунтовом разрезе основания) случайных параметров. Детерминированные параметры задаются вне блока SAFETY. Поэтому здесь мы перечислим только случайные параметры, розыгрыш которых осуществляется внутри этого блока. Случайные параметры представлены в виде двух групп.

К первой группе относятся: средняя годовая температура наружного воздуха, средняя годовая скорость ветра, среднее за зимний период термическое сопротивление снежного покрова, коэффициент условий работы вентиляционных отверстий подполья здания, температура воздуха в помещениях первого этажа или подвала при наличии последнего.

Ко второй группе относятся грунтовые характеристики по каждому, выделенному в пределах основания литологическому слою, включая и мощность слоя. В расчете используются следующие грунтовые характеристики, относящиеся к талому и мерзлому состоянию грунта: влажность, плотность, плотность частиц грунта, влажность на границах раскатывания и текучести, коэффициент сжимаемости, льдистость мерзлого грунта за счет ледяных включений и коэффициент оттаивания. Теплофизические характеристики грунта программа рассчитывает по перечисленным физическим характеристикам, используя нормативные таблицы.

Считается, что параметры первой группы подчиняются нормальному закону распределения, а параметры второй – равномерному. Поэтому первые задаются своим математическим ожиданием и средним квадратичным отклонением, а вторые – частными репрезентативными выборками их значений, которые получают в результате инженерно-геологических изысканий. Информация о перечисленных грунтовых характеристиках задается с указанием номера образца, к которому эти характеристики относятся.

Розыгрыш параметров, не зависящих от времени, производит оператор 7.3 помощью псевдослучайных чисел gav и $norm$, вычисляемых по специальному алгоритму.

Значение грунтовых характеристик извлекают из выборки по номеру того образца, который совпадает с числом gav . Далее оператор 7.3 вычисляет функционально связанные с разыгранными грунтовыми параметрами: плотность сухого грунта, коэффициент пористости, степень влажности (для песчаных грунтов), показатель консистенции (для глинистых грунтов), коэффициент теплопроводности и теплоемкость грунта.

Розыгрыш термического сопротивления снега, коэффициента условий работы вентиляционных отверстий и температуры воздуха в помещениях производится с помощью числа $norm$ по формуле: $u = M_u + norm \cdot \sigma_u$ (u – значение разыгрываемого параметра; M_u, σ_u – математическое ожидание параметра и его среднее квадратичное отклонение)

Розыгрыш параметров, зависящих от времени осуществляет оператор 7.5.

Вычисление температуры поверхности грунта под зданием T_1 и вне здания T_2 осуществляет оператор 7.6.

Вычисление глубины промерзания талых и оттаивания мерзлых грунтов под зданием осуществляет оператор 7.8 применительно к пяти расчетным случаям.

Случай 1: Расчет глубины оттаивания мерзлого грунта под серединой

здания при $T_1 > 0$

Случай 2: То же под краем здания.

Случай 3: Расчет глубины многолетнего промерзания грунта под краем здания, расположенного на участке с глубоким залеганием ММГ при $T_1 > 0$ и $T_2 < 0$.

Случай 4: Расчет глубины многолетнего промерзания грунта под серединой здания, расположенного на участке с глубоким залеганием ММГ при $T_1 < 0$ и $T_2 < 0$.

Случай 5: То же под краем здания.

Реализация оператора 7.8 наиболее трудоемкая часть программы, поэтому в целях экономии машинного времени основные вычисления производятся до вхождения в блок SAFETY и по результатам этих вычислений составляются таблицы возможных значений глубин промерзания и оттаивания, которые передаются в блок SAFETY. По этим таблицам в самом блоке, где производятся сотни и тысячи операций, методом интерполяции определяются расчетные значения глубин.

Вычисление несущей способности основания осуществляет оператор 7.9 применительно к трем расчетным случаям.

Случай 1: Подошва фундамента находится в мерзлом грунте, слой сезонного промерзания-оттаивания сливается с ММГ.

Случай 2: Подошва фундамента находится в мерзлом грунте, слой сезонного промерзания-оттаивания не сливается с ММП.

Случай 3: Подошва фундамента находится в талом грунте. Расчет производится только на первом году эксплуатации здания.

Вычисление совместной деформации основания и здания осуществляет оператор 7.12. Он производится только для случая, когда подошва фундамента находится в талом грунте.

По результатам расчета совместной деформации под серединой s_c и краем s_k определяется затем средняя s_{cp} и относительная s_o осадка здания, которые являются выходными параметрами оператора 7.12.

Вычисление действующих на фундамент сил морозного пучения и сил защемления фундамента в грунте производит оператор 7.16 отдельно для середины и края здания применительно к двум расчетным случаям.

Случай 1: Подошва фундамента находится в талом грунте.

Случай 2: Подошва фундамента находится в мерзлом грунте.

Оператор 7.19 формирует массив отказов, при этом отдельно учитываются отказы по несущей способности, осадке и пучению, что облегчает в дальнейшем анализ полученных результатов.

Оператор 7.21 вычисляет функцию надежности.

Итак, для вычисления функции надежности основания здания надо стохастическую задачу заменить множеством детерминированных задач, т.е. поставить опыты. Для постановки опыта производят розыгрыш стохастических параметров и на его основе выбирают геологический разрез, свойства

грунта, климатические и техногенные параметры. Далее для каждой теперь уже детерминированной задачи на каждом году эксплуатации произвести теплофизические и механические расчеты основания и определить несущую способность основания, величину совместной деформации основания и здания, а также действующие на фундамент силы пучения и силы защемления фундамента в грунте. Полученные результаты сравнить с предельными значениями, а именно с нагрузкой на основание и его предельно допустимой деформацией, и определить число случаев нарушения предельных условий (число отказов). Отношение числа отказов к числу опытов есть вероятность отказа, а ее дополнение до единицы – безотказность. Последовательность значений безотказности на каждом году эксплуатации есть функция надежности.

Учет глобального потепления климата производится на стадии вычисления температуры воздуха. Эта процедура осуществляется по формуле (3.4), где вместо случайной составляющей $t_\alpha \cdot \sigma_\eta$ принимается случайная составляющая $norm \times \sigma_\eta$.

5.5. Аналитические методы определения функции надежности

Принцип I.

Для этого случая задача оценки функции надежности основания инженерного сооружения формулируется следующим образом:

$$P(t) = P \left| \begin{array}{l} F_u(\tau) \geq F_v(\tau), \\ Y_0(\tau) \leq Y_u, \\ 0 \leq \tau \leq t \end{array} \right|, \quad (5.12)$$

где $P(t)$ – функция надежности основания, б.р; F_u – несущая способность основания, F_v – вертикальная нагрузка, передаваемая на основание, н; Y_0 – горизонтальное перемещение головы колонны или сваи под действием горизонтальной нагрузки, м; Y_u – предельно допустимое горизонтальное перемещение головы колонны или сваи, определяемое прочностью материала, м; t – текущее время, ч.

Первое условие выражения (5.12) в вероятностной постановке запишется:

$$F_u^* + \varphi(t) \geq F^* + \eta(t), \quad (5.13)$$

где F_u^* – математическое ожидание несущей способности основания, определяется по СНиП 2.02.04-88; F^* – математическое ожидание нагрузки на основание; $\varphi(t)$, $\eta(t)$ – стационарные нормальные случайные процессы с математическим ожиданием равным нулю.

Для висячей сваи, пренебрегая несущей способностью ее торца, что идет в запас расчета, несущую способность сваи можно вычислить по сле-

дующей формуле:

$$F_u^* = A \cdot R_{af}, \quad (5.14)$$

где A – площадь боковой поверхности сваи в многолетнемерзлом грунте; R_{af} – расчетное сопротивление мерзлых грунтов и грунтовых растворов сдвигу по поверхности смерзания в Па, определяется по таблице 3 Приложения 2 СНиП 2.02.04-88, а для известково-песчаных растворов может быть вычислена по формуле (6), аппроксимирующей данные этой таблицы:

$$R_{af} = k_1 \cdot (0.27 + 1.5 \cdot \sqrt{-T}) \cdot 10^5, \quad (5.15)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий шероховатость боковой поверхности сваи, принимается, равным 0,7 для металлических свай и 1,0 для железобетонных; T – эквивалентная температура грунта, вычисляемая по формуле (5.20) или (5.21), °С.

Установлено, что $\eta(t)/F^* = 0,01 - 0,02$, поэтому процессом $\eta(t)$ пренебрегаем.

Поделив правую и левую часть (5.13) на среднее квадратичное отклонение

σ_φ процесса $\varphi(t)$ получим: $-\frac{\varphi(t)}{\sigma_\varphi} = \frac{F_u^* - F^*}{\sigma_\varphi}$ или

$$\psi(t) \leq \gamma_v, \quad (5.16)$$

где γ_v – характеристика безопасности при вертикальной нагрузке, вычисляемая по формуле (5.15).

Умножая и деля правую часть выражения (5.16) на F_u , получим:

$$\gamma_v = \frac{F_u^* - F^*}{\sigma_\varphi} \cdot \frac{F_u^*}{F_u^*} = \frac{1 - \frac{F^*}{F_u^*}}{v_{F_u}}, \quad (5.17)$$

где $v_{F_u} = \frac{\sigma_\varphi}{F_u^*}$ – коэффициент вариации несущей способности основания.

Далее определим число выбросов из области допустимых состояний, обусловленных вертикальной нагрузкой, применяя к ним распределение Пуассона. Это обоснованно, поскольку нас интересуют только высоконадежные системы, для которых выбросы являются редкими событиями и их математическое ожидание в году определяется по формуле:

$$m(\gamma_v) = \frac{\exp(-0,5\gamma_v^2)}{\gamma_v \sqrt{2\pi}}, \quad (5.18)$$

Для вычисления $m(\gamma_v)$ по формуле (5.18) надо предварительно вычислить по формуле (5.17) характеристику безопасности γ_v и по формуле (5.19), вывод которой сделан Г.П. Пустовойтом (Хрусталева, Пустовойт, 1988), коэффициент вариации несущей способности основания.

$$v_{F_u} = \frac{0.9 \cdot (-T_0' / A)^{1/3} \cdot \sigma \cdot D}{-2 \cdot T - C \cdot \sqrt{-T}}, \quad (5.19)$$

где T_0' – расчетная температура поверхности грунта под сооружением, для

отдельно стоящей опоры принимается равной температуре грунта на глубине годовых теплооборотов в естественных условиях T_0 , °C; A – амплитуда сезонных колебаний наружного воздуха (деленная на два разницы среднемесячных температур наружного воздуха между самым теплым и самым холодным месяцем года, обычно $A = 15-30$ °C), °C; σ – среднее квадратичное отклонение средней годовой температуры наружного воздуха, обычно $\sigma = 0,7-1,6$ °C; D – коэффициент затухания температурной дисперсии с глубиной, зависит от типа фундамента и параметра: $y = 0,019 \cdot z \cdot \sqrt{C_f / \lambda_f}$ (z – глубина заложения фундамента, считая от верхней границы многолетнемерзлых грунтов, м; C_f – теплоемкость мерзлого грунта, Вт·ч/(м³·°C); λ_f – теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м·°C)).

Формулы для определения T и D

$$\text{Здание} \quad T = \alpha \cdot (T_0' - T_{bf}) + k \cdot (T_0 - T_0') + T_{bf}, \quad (5.20)$$

$$\text{Отдельно стоящая опора} \quad T = \alpha \cdot (T_0 - T_{bf}) + T_{bf}, \quad (5.21)$$

где T_0 – температура грунта на глубине нулевых теплооборотов в естественных условиях °C;

T_{bf} – температура промерзания – оттаивания грунта, °C.

Столбчатый фундамент

$$\alpha = 1 - \exp(-y), \quad (5.22)$$

$$D = \frac{1}{y} \cdot \sqrt{1 - (1 + y \cdot \sqrt{2}) \exp(-y \cdot \sqrt{2})}, \quad (5.23)$$

$$k = \frac{2}{\pi} \arctg(u), \quad (5.24)$$

где $y = 0,019z \cdot \sqrt{C_f / \lambda_f}$; $u = 2z / b_{30}$ (b_{30} – ширина здания).

Свайный фундамент

$$\alpha = 0,44 \cdot \sqrt{y}, \quad (5.25)$$

$$D = \begin{cases} [0,78 + 0,74 \cdot \ln(y)] / y & \text{при } y > 1 \\ 1 - 0,22 \cdot y & \text{при } y \leq 1 \end{cases}, \quad (5.26)$$

$$k = \frac{2}{\pi} \cdot \arctg(u) - \frac{\ln(1 + u^2)}{\pi \cdot u}, \quad (5.27)$$

Второе условие в выражении (5.12) можно записать в виде (*Рекомендации*, 1974):

$$Yu \geq G(t) \cdot F_h(t), \quad (5.28)$$

$$G(t) = \frac{l_{uz}^2}{6EJ} \cdot \frac{1 - \cos(\delta \cdot l_{uz})}{\delta \cdot \sin(\delta \cdot l_{uz})}, \quad (5.29)$$

где F_h – горизонтальная нагрузка на голову колонны или сваи в уровне ростверка, н; l_{uz} – изгибаемый участок колонны или сваи, м; EJ – жесткость сечения колонны или сваи, н·м²; δ – параметр, учитывающий влияние вертикальной нагрузки, 1/м.

$$\delta = \sqrt{\frac{F_v}{EJ}}, \quad (5.30)$$

$$l_{из} = l_0 + D_{th} + 1.5 \cdot b, \quad (5.31)$$

l_0 – высота головы колонны или сваи над дневной поверхностью, м;
 b – наибольшая сторона призматической колонны или сваи или внешний диаметр колонны или сваи круглого сечения, м; D_{th} – глубина сезонного оттаивания грунта, м.

При этом правая часть выражения (5.28) есть Y_0 , а левая зависит от прочности сваи и вычисляется по формуле:

$$Y_u \leq \frac{\sigma_{fl} \cdot l_{из}^2 \cdot W}{6EJ}, \quad (5.32)$$

где σ_{fl} – предел прочности материала (для стали – предел текучести стали), Па; W – момент сопротивления сечения колонны или сваи, м³.

Поделив обе части неравенства (5.28) на $G(t)$, мы представим второе условие в формуле (5.12) в виде соотношения между горизонтальными нагрузками аналогичное выражению (5.13) – соотношению между вертикальными нагрузками. Далее рассуждая также как и в случае вертикальных нагрузок, получим формулу для коэффициента безопасности в случае горизонтальной нагрузки:

$$\gamma_h = \frac{F_{h,u} / F_h^* - 1}{\nu_{Fh}} = \frac{Y_u / Y_0^* - 1}{\nu_{Fh}}, \quad (5.33)$$

где $F_{h,u}, F_h^*$ – математическое ожидания предельной и фактической горизонтальной нагрузки, н; ν_{Fh} – коэффициент вариации горизонтальной нагрузки, б.р.; Y_0^* – математическое ожидание горизонтального перемещения головы сваи, м;

Коэффициент вариации горизонтальной нагрузки, которая в основном зависит от ветрового давления на надземную часть сооружения, выразим через коэффициент вариации максимальной скорости ветра. Известно, что ветровое давление прямо пропорционально квадрату максимальной скорости ветра $F_h = K \cdot W_{\max}^2$. При нормальном законе распределения математическое ожидание и дисперсия этой функции будут равны:

$$m_{Fh} = K \cdot m_{W_{\max}}, \text{ а } D_{Fh} = \left[\frac{\partial(K \cdot W_{\max})}{\partial W_{\max}} \right]^2 \cdot D_{W_{\max}} = (2 \cdot K \cdot m_{W_{\max}})^2 \cdot D_{W_{\max}}.$$

Откуда среднее квадратическое отклонение горизонтальной нагрузки будет: $\sigma_{Fh} = \sqrt{D_{Fh}} = 2 \cdot K \cdot m_{W_{\max}} \cdot \sigma_{W_{\max}}$. Поделив среднее квадратическое отклонение горизонтальной нагрузки на ее математическое ожидание получим коэффициент вариации горизонтальной нагрузки:

$$\nu_{Fh} = \frac{2 \cdot K \cdot m_{W_{\max}} \cdot \sigma_{W_{\max}}}{K \cdot m_{W_{\max}}} = 2 \cdot \frac{\sigma_{W_{\max}}}{m_{W_{\max}}} = 2 \cdot \nu_{W_{\max}}.$$

С учетом этой зависимости перепишем формулу (5.33).

$$\gamma_h = \frac{Y_u / Y_0^* - 1}{2 \cdot v_{W \max}}, \quad (5.34)$$

Теперь по аналогии с (5.18) напомним формулу для интенсивности отказов при действии горизонтальной нагрузки:

$$m(\gamma_h) = \frac{\exp(-0,5\gamma_h^2)}{\gamma_h \sqrt{2\pi}}, \quad (5.35)$$

Из теории выбросов известно, что число выбросов n есть дискретная случайная величина с интегральной функцией распределения $F_y(t, n)$. Отсюда следует, что $P(t) = F_y(t, 0)$. Для распределения Пуассона $F_y(t, 0) = \exp[-\mu(t)]$, где $\mu(t)$ – математическое ожидание числа выбросов за время t .

Допуская, что выбросы от действия вертикальной и горизонтальной нагрузки являются независимыми случайными процессами, их число можно считать аддитивной величиной, т.е. число выбросов за время t равно сумме выбросов от действия вертикальной и горизонтальной нагрузки за каждый год в интервале времени от 0 до t :

$$\mu(t) = \sum_{i=1}^k [m_i(\gamma_v) + m_i(\gamma_h)], \quad (5.36)$$

где k – число лет за время t .

Принимая вышесказанное во внимание, окончательно получим:

$$P(t) = \exp[-\mu(t)]. \quad (5.37)$$

Если пренебречь горизонтальными перемещениями головы фундаментной колонны или сваи, например, при проектировании зданий, где вертикальная нагрузка на фундамент намного превышает горизонтальную, то расчеты надежности упрощаются. В этом случае выражение (5.12) запишется:

$$P(t) = P \left| \begin{array}{l} F_u(\tau) \geq F_v(\tau) \\ 0 \leq \tau \leq t \end{array} \right|. \quad (5.38)$$

А формула (5.17) примет вид:

$$\gamma_v = \frac{1 - 1/K_n}{V_{Fu}}, \quad (5.39)$$

где $K_n = F_u^* / F_v^*$ (в случае отсутствия изменения климата величина постоянная, называемая коэффициентом надежности и принимаемая в зависимости от класса сооружения 1,05 – 1,2).

Формула (5.37) перепишется:

$$P(t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^k m_i(\gamma_v) \right], \quad (5.40)$$

где $m_i(\gamma_v)$ – математическое ожидание числа выбросов в i -ом году, определяется по формуле (5.18).

Заметим, что в случае отсутствия глобального изменения климата интенсивность отказов в каждом году одинакова $\mu(t) = \mu = \text{const}$ и тогда

формулу (5.37) можно переписать: $P(t) = \exp(-t \cdot \mu)$, (5.41)

Для зданий в случае отсутствия глобального изменения климата:

$$P(t) = \exp[-t \cdot m(\gamma_v)] \quad (5.41a)$$

Принцип II

При строительстве зданий и сооружений по принципу II предельное условие записывается:

$$S(t) \leq s_u, \quad (5.42)$$

где $S(t)$ – осадка грунтов основания за время t за счет их оттаивания под действием тепла от сооружения (случайный процесс), м; s_u – предельно допустимая осадка, определяемая прочностью сооружения (детерминированная величина), м.

$$S(t) = S_0 + \delta \cdot \Delta H(t), \quad (5.43)$$

где S_0 – осадка талого грунта, расположенного над многолетнемерзлым (не сливающейся тип многолетнемерзлых грунтов) после передачи на него нагрузки, м; δ – сжимаемость многолетнемерзлых грунтов при оттаивании, б.р.; $\Delta H(t)$ – приращение оттаивания за время t , возрастающая со временем величина, м.

Из выражения (5.43) следует, что осадка со временем может только возрасть, а качество системы только ухудшаться, т.е. система является стареющей и поэтому к ней может быть применима кумулятивная модель отказов. В наших обозначениях функция надежности кумулятивной модели записывается:

$$P(t) = P \left[\begin{matrix} S(\tau) \leq s_u \\ 0 \leq \tau \leq t \end{matrix} \right] = F_t(S^*), \quad (5.44)$$

где $F_t(S^*)$ – интегральная функция распределения случайной величины $S^* = s_u - S$ на текущий момент времени t , для кумулятивной модели она

равна функции нормального распределения $F_t(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp(-u^2 / 2) \cdot du$

Расчеты показывают, что вклад S_0 в дисперсию случайной величины S составляет около 1%, поэтому S_0 будем считать детерминированной величиной (s_0) и вычтем ее из s_u , т.е. $s_u' = s_u - s_0$, и выражение (5.42) перепишем:

$$S(t) = \delta \cdot \Delta H(t) \leq s_u'. \quad (5.45)$$

В работе (Хрусталева, Пустовойт, 1988) доказывалось, что величина $S(t)$ на момент времени t подчиняется нормальному закону распределения с математическим ожиданием m_S и дисперсией D_S .

$$m_S = m_\delta \cdot m_{\Delta H}(t), \quad (5.46)$$

$$D_S = m_{\Delta H}^2 \cdot D_\delta + m_\delta^2 \cdot D_{\Delta H}, \quad (5.47)$$

где m_δ – математическое ожидание величины сжимаемости мерзлого грунта при оттаивании

вании, определяется по данным изысканий, а при их отсутствии по формулам, приведенным в монографии В.П. Ушкалова (1962), при средних значениях параметров, входящих в эти формулы, б.р.; $m_{\Delta H}$ – приращения оттаивания, определяется по формуле (5.48), м; $D_{\delta}, D_{\Delta H}$ – дисперсия, соответственно, величины сжимаемости мерзлых грунтов при оттаивании и приращения оттаивания.

$$m_{\Delta H} = H(t) - H_0, \quad (5.48)$$

где $H(t)$ – глубина оттаивания под сооружением на момент времени t , при однородном основании определяется аналитически (Порхаев, 1970; Хрусталева, 2005), в остальных случаях численно (Хрусталева, 1966), м; H_0 – положение кровли многолетнемерзлых грунтов на момент времени $t = 0$, м.

Первое слагаемое в правой части выражения (5.47) много больше (в 50 раз и более) второго слагаемого, поэтому с полным основанием выражение (5.45) можем переписать:

$$D_S \approx m_{\Delta H}^2 \cdot D_{\delta} \quad \text{или, извлекая корень,} \quad \sigma_S \approx m_{\Delta H} \cdot \sigma_{\delta}, \quad (5.49)$$

где $\sigma_S, \sigma_{\delta}$ – средние квадратические отклонения величин S и δ .

С учетом сказанного функция надежности основания стареющей системы может быть записана:

$$P(t) = F_t(S^* = 0) = \frac{1}{2} + \Phi(x^*), \quad (5.50)$$

$$x^* = \frac{s_u - m_{\delta} \cdot m_{\Delta H}}{m_{\Delta H} \cdot \sigma_{\delta}}, \quad (5.51)$$

где $\Phi(x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{x^*} \exp(-u^2/2) \cdot du$ – интеграл вероятностей, табулированная функция параметра x^* (Корн Г. и Корн Т., 1974).

Значение предельной деформации s_u рассчитывается по законам строительной механики. Для зданий результаты расчета сведены в единую таблицу (СНиП 2.02.01-83), где в зависимости от вида сооружения даны предельные значения деформаций. Для трубопроводов расчет может осуществляться по методике, изложенной в монографии (Тартаковский, 1967). Для железных дорог величина предельной осадки назначается из условия возможности размещения балластной призмы на основной площадке при подъеме пути на балласт, т.е. она равна ширине обочины земляного полотна, обычно 0,4 м. Для автомобильных дорог принимается в зависимости от вида покрытия 0,01 – 0,14 м.

5.6. Примеры решения задач

Пример 1. Требуется рассчитать функцию надежности свайной опоры надземного нефтепровода, расположенного в районе Якутска. Срок экс-

плуатации нефтепровода $t_s = 28$ лет. Изменение температуры многолетнемерзлых грунтов T_0 глубины сезонного оттаивания D_{th} во времени t , происходящее вследствие потепления климата и вычисленное по методике, изложенной в гл. 4, показано в таб. 5.3.

Исходные данные.

Свая выполнена из металлической трубы диаметром $d_{out} = 0,325$ м, длиной подземной части $l = 5,0$ м, жесткостью $EJ = 2,46 \cdot 10^7 \text{ н} \cdot \text{м}^2$. Момент сопротивления сечения сваи равен $W = 7,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, предел текучести стали – $\sigma_{\pi} = 3,6 \cdot 10^8 \text{ Па}$. Ростверк сваи расположен над поверхностью земли на высоте $l_0 = 3,0$ м. Вертикальная нагрузка на сваю составляет $F_v^* = 14,9 \cdot 10^4 \text{ н}$. Горизонтальная нагрузка на голову сваи – $F_h^* = 41070 \text{ н}$. Грунтовые характеристики: $T_0 = -3,14^\circ \text{C}$, $T_{bf} = -0,1^\circ \text{C}$, $D_{th} = 1,29 \text{ м}$, $\lambda_f = 1,86 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ \text{C)}$, $C_f = 522 \text{ Вт} \cdot \text{ч/(м}^3 \cdot ^\circ \text{C)}$. Климатические характеристики: $A = 30^\circ \text{C}$, $\sigma = 1,0^\circ \text{C}$, $v_w = 0,26$.

Последовательность расчетов на примере первого года:

$$z = 5 - 1,29 = 3,71 \text{ м}, y = 0,019 \cdot 3,71 \cdot \sqrt{522/1,86} = 1,18 \text{ б.р.}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.25) вычисляем } \alpha = 0,44 \cdot \sqrt{1,18} = 0,478 \text{ б.р.}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.26) } - D = [0,78 + 0,74 \cdot \ln(1,18)]/1,18 = 0,765 \text{ б.р.}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.21) } - T = 0,485 \cdot (-3,14 + 0,1) - 0,1 = -1,55^\circ \text{C}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.19) } -$$

$$\nu_{Fu} = \left[0,9 \cdot (-3,14/30)^{1/3} \cdot 1,0 \cdot 0,765 \right] / (2 \cdot 1,55 - 0,47 \cdot \sqrt{1,55}) = 0,104 \text{ б.р.}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.15) } - R_{af} = 0,7 \cdot (0,27 + 1,5 \cdot \sqrt{1,55}) \cdot 10^5 = 149774 \text{ Па}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.14) } - F_u^* = \pi \cdot 0,325 \cdot 3,71 \cdot 149774 = 567340 \text{ н}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.17) } - \gamma_v = (1 - 180000/567340)/0,104 = 7,048 \text{ б.р.}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.18) } - m(\gamma_v) = [\exp(-0,5 \cdot 7,048^2)] / (7,48 \cdot \sqrt{2\pi}) = 9,23 \cdot 10^{-13}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.31) } - l_{uz} = 3,0 + 1,29 + 1,5 \cdot 0,325 = 4,78 \text{ м}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.32) } - Y_u = 3,6 \cdot 10^8 \cdot 4,78^2 \cdot 7,56 \cdot 10^{-4} / (6 \cdot 2,46 \cdot 10^7) = 0,0436 \text{ м}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле}$$

$$(5.30) - \delta = \sqrt{446147/(180000 \cdot 24600000)} = 0,000318 \text{ м}^{-1}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.28) } -$$

$$Y_0^* = \frac{4,78^2}{6 \cdot 2,46 \cdot 10^7} \cdot \frac{1 - \cos(0,000318 \cdot 4,78)}{0,000318 \cdot \sin(0,000318 \cdot 4,78)} \cdot 41070 = 0,0154 \text{ м}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.34) } - \gamma_h = (0,0436/0,0154 - 1)/(2 \cdot 0,26) = 3,529 \text{ б.р.}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.35) } - m(\gamma_h) = [\exp(-0,5 \cdot 3,529^2)] / (3,529 \cdot \sqrt{2\pi}) = 0,000224 \text{ б.р.}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.36) } - \mu(1) = 0 + 9,23 \cdot 10^{-13} + 0,000224 = 0,000224 \text{ б.р.,}$$

$$\Rightarrow \text{по формуле (5.37) } - P(1) = \exp(-0,000224) = 0,999776 \text{ б.р.}$$

Далее расчеты ведутся аналогично в табличной форме (табл. 5.3).

Ответ: Значение функции надежности приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Исходные данные и результаты расчета

t , лет	1	2	3	4	5	6	7
T_0 , °C	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14
D_{th} , м	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
$m(\gamma_v)$, б.р.	$9,23,10^{-13}$	$9,23,10^{-13}$	$9,23,10^{-13}$	$9,23,10^{-13}$	$9,23,10^{-13}$	$9,23,10^{-13}$	$9,23,10^{-13}$
$m(\gamma_h)$, б.р.	0,000224	0,000224	0,000224	0,000224	0,000224	0,000224	0,000224
$\mu(t)$, б.р.	0,000224	0,000447	0,000671	0,000894	0,001118	0,001342	0,001565
$P(t)$, б.р.	0,999776	0,999553	0,999329	0,999106	0,998883	0,998659	0,998436
<i>продолжение</i>							
t , лет	8	9	10	11	12	13	14
T_0 , °C	-3,14	-3,14	-3,14	-2,52	-2,52	-2,52	-2,52
D_{th} , м	1,29	1,29	1,29	1,68	1,68	1,68	1,68
$m(\gamma_v)$, б.р.	$9,23,10^{-13}$	$9,23,10^{-13}$	$9,23,10^{-13}$	$9,12,10^{-8}$	$9,12,10^{-8}$	$9,12,10^{-8}$	$9,12,10^{-8}$
$m(\gamma_h)$, б.р.	0,000224	0,000224	0,000224	0,009966	0,009966	0,009966	0,009966
$\mu(t)$, б.р.	0,001789	0,002012	0,002236	0,012202	0,022168	0,032134	0,042100
$P(t)$, б.р.	0,998213	0,99799	0,997767	0,987872	0,978076	0,968377	0,958774
<i>продолжение</i>							
t , лет	15	16	17	18	19	20	21
T_0 , °C	-2,52	-2,52	-2,52	-2,52	-2,52	-2,52	-1,91
D_{th} , м	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,6
$m(\gamma_v)$, б.р.	$9,12,10^{-8}$	$9,12,10^{-8}$	$9,12,10^{-8}$	$9,12,10^{-8}$	$9,12,10^{-8}$	$9,12,10^{-8}$	$1,02,10^{-5}$
$m(\gamma_h)$, б.р.	0,009966	0,009966	0,009966	0,009966	0,009966	0,009966	0,005471
<i>продолжение</i>							
$\mu(t)$, б.р.	0,052066	0,062032	0,071998	0,081964	0,091930	0,101896	0,107378
$P(t)$, б.р.	0,949266	0,939853	0,930533	0,921305	0,912169	0,903123	0,898186
t , лет	22	23	24	25	26	27	28
T_0 , °C	-1,91	-1,91	-1,91	-1,91	-1,91	-1,91	-1,91
D_{th} , м	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
$m(\gamma_v)$, б.р.	$1,02,10^{-5}$	$1,02,10^{-5}$	$1,02,10^{-5}$	$1,02,10^{-5}$	$1,02,10^{-5}$	$1,02,10^{-5}$	$1,02,10^{-5}$
$m(\gamma_h)$, б.р.	0,005471	0,005471	0,005471	0,005471	0,005471	0,005471	0,005471
$\mu(t)$, б.р.	0,112859	0,11834	0,123821	0,129303	0,134784	0,140265	0,145747
$P(t)$, б.р.	0,893277	0,888394	0,883538	0,878708	0,873905	0,869128	0,864377

Пример 2. Требуется рассчитать функцию надежности подземного нефтепровода, возводимого в районе г. Якутск. Срок эксплуатации нефтепровода $t_s = 28$ лет.

Исходные данные.

Нефтепровод проложен подземно на глубине 2,7 м (расстояние от поверхности земли до оси трубы). Наружный диаметр трубы составляет 820 мм. Нефтепровод находится в кольцевой теплоизоляции толщиной 200 мм. Температура нефти 20 °C. Кровля многолетнемерзлых грунтов распо-

ложена на глубине $H_0 = 7,6$ м. Динамика оттаивания многолетнемерзлых грунтов под серединой нефтепровода $H(t)$, установлена численным методом с использованием компьютерной программы «WARM» (Программа, 1994), представлена в табл. 5.4. Предельно допустимая осадка трубы составляет $s_u' = 0,5$ м. Матожидание величины сжимаемости мерзлого грунта при оттаивании – $m_\delta = 0,11$ б.р.; среднеквадратическое отклонение величины сжимаемости мерзлого грунта при оттаивании – $\sigma_\delta = 0,027$ б.р.

Последовательность расчетов.

Расчеты ведутся в табличной форме (табл. 5.4). Вначале по формуле (5.48) вычисляется $m_{\Delta H}$, далее по формуле (5.51) – x^* и затем по формуле (5.50) – $P(t)$.

Ответ: Значение функции надежности приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Исходные данные и результаты расчета

t , лет	1	2	3	4	5	6	7
$H(t)$, м	7,72	7,91	8,09	8,26	8,52	8,78	9,07
$m_{\Delta H}(t)$, м	0,12	0,31	0,49	0,66	0,92	1,18	1,47
$x^*(t)$, б.р.	150,30	55,66	33,72	23,98	16,05	11,62	8,52
$P(t)$, б.р.	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
<i>продолжение</i>							
t , лет	8	9	10	11	12	13	14
$H(t)$, м	9,34	9,60	9,84	10,07	10,30	10,52	10,74
$m_{\Delta H}(t)$, м	1,74	2,00	2,24	2,47	2,70	2,92	3,14
$x^*(t)$, б.р.	6,57	5,19	4,19	3,42	2,78	2,27	1,82
$P(t)$, б.р.	0,9999	0,9999	0,9999	0,9997	0,9973	0,9884	0,9656
<i>продолжение</i>							
t , лет	15	16	17	18	19	20	21
$H(t)$, м	10,92	11,11	11,31	11,49	11,67	11,85	12,02
$m_{\Delta H}(t)$, м	3,32	3,51	3,71	3,89	4,07	4,25	4,42
$x^*(t)$, б.р.	1,50	1,20	0,92	0,69	0,48	0,28	0,12
$P(t)$, б.р.	0,9332	0,8850	0,8186	0,7549	0,6834	0,6103	0,5478
<i>продолжение</i>							
t , лет	22	23	24	25	26	27	28
$H(t)$, м	12,19	12,36	12,51	12,66	12,82	12,98	13,12
$m_{\Delta H}(t)$, м	4,59	4,76	4,91	5,06	5,22	5,38	5,52
$x^*(t)$, б.р.	-0,04	-0,18	-0,30	-0,41	0,53	-0,63	-0,72
$P(t)$, б.р.	0,4851	0,4286	0,3821	0,3409	0,2981	0,2644	0,2358

Выводы

1. Вероятностно – статистические методы расчета теплового и механического взаимодействия инженерных сооружений с окружающей средой имеют большие преимущества по сравнению с детерминистическими методами, входящими в состав почти всех нормативных документов. Они учитывают случайную изменчивость всей расчетной информации и на этой основе позволяют оценивать опасности (риски) возможных аварий сооружений до окончания срока их эксплуатации, что невозможно сделать, используя детерминистические расчеты. В связи с этим вариантное проектирование приобретает новый смысл, появляется возможность оценивать варианты не только по стоимости, но и по вероятности их безаварийной работы. Кроме того, появляется возможность предсказывать аварии уже построенных сооружений и на основе этих предсказаний принимать управляющие решения. Особое значение вероятностно-статистические методы приобретают в условиях климатических изменений – процесса по сути своей случайного и плохо прогнозируемого.

2. В настоящее время основой вероятностно-статистических расчетов является метод Монте-Карло, который заменяет вероятностную задачу многократным решением детерминистической задачи и на основе статистической обработки результатов решения позволяет построить функцию надежности геотехнической системы – изменение во времени вероятности ее безаварийной работы. Метод работает в многомерном пространстве качества и не чувствителен к сложности преобразующего оператора входных параметров в выходные. Однако ему присущи и некоторые недостатки – большая потребность машинного времени (метод реализуется на компьютерах) и сложность анализа полученных результатов.

3. Аналитические методы свободны от этих недостатков, однако работают только в одномерном пространстве качества, используя известные стохастические модели отказов.

В связи с этим их применение ограничено. В нашем случае аналитические методы применяются для построения функции надежности только тех геотехнических систем, где заведомо известно, что устойчивость системы от действия сил пучения обеспечивается и отсутствуют запредельные осадки в системах, возводимых по принципу I, а также нет отказов по несущей способности грунтовых оснований в системах, возводимых по принципу II.

Глава 6

Выбор оптимальных решений при проектировании инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах с учетом глобального изменения климата.

6.1. Оценка опасности (риска) разрушения сооружения до окончания срока его эксплуатации. Цена риска

Опасность возможных аварий сооружений обратно пропорциональна их надежности. Чем выше надежность, тем меньше опасность или иначе вероятность отказа геотехнической системы, которую принято называть риском. Итак, риск есть вероятность отказа системы (вероятность аварии) в течение всего срока ее эксплуатации. А зависимость вероятности отказа от времени – функция риска. Аналитически функция риска выражается следующим образом:

$$R(t) = \left[\begin{array}{l} \nu_i(\tau) \geq \nu_{\lim, i}(\tau), i = 1, 2 \dots n \\ 0 \leq \tau \leq t \end{array} \right], \quad (6.1)$$

где $R(t)$ – функция риска; остальные обозначения указаны в расшифровке к формуле (5.1).

Функция риска связана с функцией надежности простым выражением:

$$R(t) = 1 - P(t), \quad (6.2)$$

Функция риска дает возможность оценить материальный ущерб, который возникает при отказе геотехнической системы. Этот ущерб называется ценой риска и есть экономический эквивалент надежности. Для ее определения условимся, что каждому отказу системы (ее разрушению) соответствуют экономические потери $C_{\text{вос}}$, равные затратам на ремонт системы, затратам на ликвидацию экологических последствий аварии и плюс побочный ущерб, обусловленный прекращением функционирования системы до окончания ремонта. Эти затраты назовем штрафной функцией времени, поскольку они зависят от времени наступления отказа, и запишем в виде следующего выражения:

$$c_y(t) = \begin{cases} \frac{C_{\text{вос}}}{(1+E)^t}, & \text{при } t \leq t_3, \\ 0, & \text{при } t > t_3, \end{cases}, \quad (6.3)$$

где t_3 – период эксплуатации, лет; t – время наступления отказа, год; E – нормативный коэффициент приведения разновременных затрат.

Как уже отмечалось, функция отказа есть дополнение до единицы функции надежности. Тогда плотность отказа, т.е. вероятность отказа на

интервале времени от t до $t + dt$ будет равна:

$$p_y = \frac{d[1 - P(t)]}{dt} = -P'(t), \quad (6.4)$$

где $P'(t)$ – первая производная функции надежности по времени.

Зная плотность отказа и штрафную функцию легко вычислить математическое ожидание стоимости отказа, которую и примем за цену риска:

$$C_R = \int_0^{\infty} c_y(t) \cdot p_y(t) \cdot dt = - \int_0^{\infty} c_y(t) \cdot P'(t) \cdot dt, \quad (6.5)$$

Конечно-разностный аналог формулы (6.5) будет:

$$C_R = C_{\text{вос}} \cdot \sum_{k=1}^m \frac{P[(k-1) \cdot h] - P(k \cdot h)}{(1+E)^{k \cdot h} \cdot h}, \quad (6.6)$$

где m – количество временных шагов за период эксплуатации сооружения; h – продолжительность временного шага.

Если измерять t в годах, а h положить равным одному году, то формулу (6.6) можно переписать:

$$C_R = C_{\text{вос}} \cdot \sum_{k=1}^m K(k) \cdot m(k), \quad (6.7)$$

где $m(k)$ – плотность отказа в k -тый год, определяется по формуле (6.8); $K(k)$ – коэффициент, учитывающий время отказа, определяется по формуле (6.9).

$$m(k) = P(k-1) - P(k), \quad (6.8)$$

$$K(k) = 1/(1+E)^k, \quad (6.9)$$

Для не восстанавливаемых систем, к числу которых относится большинство зданий на многолетнемерзлых грунтах, $C_{\text{вос}}$ равно остаточной стоимости системы на момент отказа плюс побочный ущерб, связанный с прекращением работы системы и затратами на ликвидацию экологических последствий аварии, что можно представить в виде формулы:

$$C_{\text{вос}} = C_0 \cdot (1 - k/m + k_3), \quad (6.10)$$

где C_0 – начальная стоимость геотехнической системы (сметная стоимость); m – период эксплуатации; k_3 – коэффициент экономической ответственности, равный отношению побочного ущерба к начальной стоимости.

6.2. Формулировка и методы решение оптимизационной задачи

Формулировка задачи.

Существуют два подхода к решению оптимизационной задачи:

- 1) построение экономического критерия и оптимизация надежности по этому критерию;
- 2) анализ надежности, успешно эксплуатируемых сооружений, и

получение обобщенной оценки надежности, которая может быть принята за нормативную.

Как известно, геотехнические системы подразделяются на два типа: с экономической и моральной ответственностью. К первым относятся системы, выход которых из строя влечет только материальные потери, ко вторым – системы, выход которых из строя сопряжен с возможной потерей жизни или здоровья людей, экологической катастрофой, потерей престижа государства и т.п.

Для систем с экономической ответственностью применяется первый подход, с моральной ответственностью – первый и второй одновременно, а именно: нормативная надежность рассматривается как ограничение снизу и оптимальная надежность отыскивается при этом ограничении, т.е. ставится задача условной оптимизации, в отличие от безусловной для систем с чисто экономической ответственностью. Перечисленные задачи формулируются следующим образом:

системы с экономической ответственностью

$$C = C_0 + C_R = \min, \quad (6.11)$$

системы с моральной ответственностью

$$C = |C_0 + C_R|_{P \geq P^H} = \min, \quad (6.12)$$

где C – суммарная приведенная стоимость системы; C_0 – начальная (сметная) стоимость системы; C_R – цена риска; P и P^H – надежность и нормативная надежность системы.

Численное решение оптимизационной задачи.

При численном методе оптимальное решение находится путем последовательных приближений на основе диалога оператора с компьютерной программой. Для этого из многочисленных конструктивных параметров системы выбираются два-три параметра и варьированием их значений находится решение уравнений (6.11) или (6.12). Эти параметры называются управляющими. Например, для зданий ими являются: модуль вентиляции проветриваемого подполья, глубина погружения свайного фундамента или площадь подошвы столбчатого или ленточного фундамента, глубина предпостроечной подготовки грунтов основания (предварительного оттаивания или промораживания грунтов); для трубопроводов при их наземной прокладке – расстояние между опорами, глубина погружения свай, при их наземной прокладке – высота призмы обвалования, толщина теплоизоляции, при подземной – глубина заложения трубы, толщина кольцевой изоляции. Однако, в принципе управляющим параметром может быть любой конструктивный параметр. Только их не должно быть больше трех, иначе задача становится трудно разрешимой.

В качестве примера рассмотрим поиск оптимального решения для системы здание – основание.

Начальную стоимость C_0 определим как сумму стоимостей надфундаментной конструкции ($C_{нф}$), вентилируемого подполья ($C_{ен}$), фундаментов ($C_{ф}$) и затрат на предпостроечную подготовку грунтов основания (C_{mn}).

$$C_0 = C_{нф} + C_{ен} + C_{ф} + C_{mn}, \quad (6.13)$$

Затраты на предпостроечную подготовку основания зависят от вида работ (промораживание или оттаивание), удельной стоимости работ и размеров здания в плане. Они определяются по формуле:

$$C_{mn} = \begin{cases} 0,01 \cdot c_f \cdot b_{зд} \cdot l_{зд} \cdot \sum_{i=j+1}^{m1} \omega_i \cdot H_{0i} & \text{промораживание} \\ 0,01 \cdot c_{th} \cdot (b_{зд} + H) \cdot (l_{зд} + H) \cdot H \cdot \sum_{i=1}^{j-1} \omega_i & \text{оттаивание} \end{cases}, \quad (6.14)$$

где c_f , c_{th} – стоимость искусственного промораживания или оттаивания единицы объема грунта; $b_{зд}$, $l_{зд}$ – ширина и длина здания; H – глубина залегания ММГ к началу эксплуатации здания (управляющий параметр), H_{0i} – глубина залегания ММГ в естественных условиях на i -ом участке (участки пронумерованы по возрастанию H_{0i}); ω_i – площадь i -го участка в % от пятна здания; $m1$ – общее количество участков в пределах пятна здания (глубина залегания ММГ в пределах участка условно считается постоянной); j – номер участка, где $H_{0j} = H$.

Цену риска будем вычислять по формулам (6.7) – (6.10).

Примем в качестве фундамента здания сваи, а в качестве управляющих параметров модуль вентиляции проветриваемого подполья M , глубину погружения свай l и глубину предварительного оттаивания H .

В численном методе оптимальная надежность находится вариацией значений управляющих параметров H и l . Расчеты осуществляются по компьютерной программе NAST (1994). Последовательность расчетов для каждой пары значений H и l такова: Вначале несколько раз вычисляется надежность при разных значениях модуля вентиляции проветриваемого подполья M и назначается такой модуль, который обеспечивает максимальную надежность при заданных значениях H и l . Такая процедура правомерна, поскольку от модуля вентиляции стоимость здания практически не меняется. Далее по выше приведенным формулам последовательно вычисляются стоимость подготовки основания, начальная стоимость, цена риска и приведенная суммарная стоимость. Затем задается новая пара значений управляющих параметров H и l и процедура повторяется и так до тех пор пока не будет найден минимум суммарной приведенной стоимости во всем интервале возможных значений l и H . Блок – схема программы приведена в приложении 8. Задача облегчается, если результаты расчета наносить на специальную номограмму, вид которой показан на рис. 6.1. Номограмма строится по результатам расчета P , C и M для конкретных сочетаний H и l , которые задаются произвольно в интервале их практически возможных изменений. Для большей наглядности за суммарную стоимость

принята стоимость нулевого цикла здания (суммарная стоимость за минусом стоимости надфундаментной конструкции, которая не зависит от геокриологических условий) и она отражена в процентах от стоимости надфундаментной конструкции.

По оси ординат номограммы отложена глубина заложения свайного

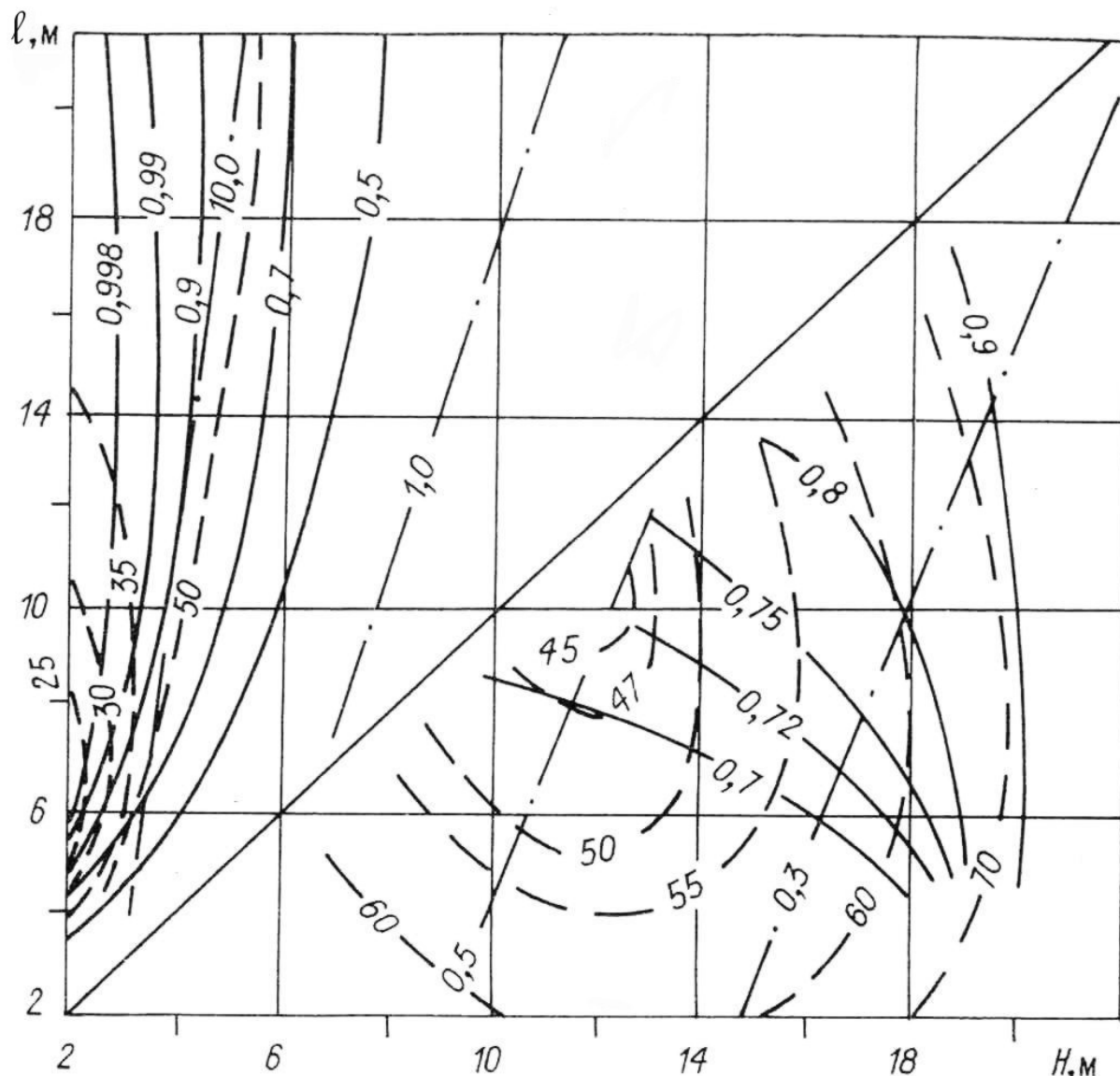


Рис. 6.1 Номограмма для выбора оптимального решения

фундамента l , по оси абсцисс – мощность талого слоя H , сплошными линиями показаны изолинии надежности P , пунктиром – суммарной приведенной стоимости нулевого цикла здания в процентах от стоимости здания выше нулевой отметки C , штрих-пунктиром – модули вентиляции проветриваемого подполья M в дол. ед. $\times 10^{-3}$. Прямая $l = H$ разделяет поле номограммы на две области. В верхней области всегда выполняется условие $l > H$, что соответствует принципу I использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания, а в нижней – условие $l < H$, что соответствует принципу II. Оптимальное решение для систем с экономической от-

ветственностью находится на номограмме путем выбора точки с минимальным значением стоимости в пределах всего поля номограммы, а для систем с моральной ответственностью – только в пределах изолинии P^H (P^H – нормативная надежность). Положением этой точки в поле номограммы определяются принцип использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания и способ фундаментостроения.

Принципу I соответствуют точки с координатами $H < l$. При этом способу фундаментостроения с предварительным промораживанием грунтов основания отвечает соотношение $H < H_{max}$ (H_{max} – максимальная глубина залегания ММГ в естественных условиях в пределах пятна здания).

Принципу II соответствуют точки с координатами $H > l$. При этом способу фундаментостроения с предварительным оттаиванием грунтов отвечают соотношения $M = 0, H > H_{min}$ (H_{min} – минимальная глубина залегания ММГ в пределах пятна здания). Способу фундаментостроения с допущением оттаивания грунтов в процессе эксплуатации – соотношение $M = 0, H \leq H_{min}$. Способу фундаментостроения со стабилизацией ММГ – соотношение $M > 0$.

Покажем, как осуществить выбор оптимального решения для системы с экономической ответственностью, возводимой на участке, для которого построена номограмма на рис. 6.1. Оптимальной точкой на номограмме (точка, в которой стоимость минимальна) в области первого принципа ($H < l$) будет точка с координатами $l = 7$ м, $H = 2$ м. Ей соответствует суммарная приведенная стоимость $C = 25$ % и надежность $P = 0,998$. Оптимальной точкой в области второго принципа ($H > l$) – точка с координатами $l = 10$ м, $H = 12$ м. Ей соответствует суммарная приведенная стоимость $C = 45$ %, надежность $P = 0,72$, а также, что очень важно, $M > 0$, т.е. здание рекомендуется возводить по способу стабилизации. Сравнивая две эти точки приходим к выводу, что строить здание надо по принципу I с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии на свайном фундаменте глубиной 7 м. Если по каким-либо причинам использования принципа I невозможно (см. ниже), то здание следует возводить по способу стабилизации на свайном фундаменте глубиной 10 м.

Аналитическое решение оптимизационной задачи

На сегодняшний день аналитическое решение существует только для зданий, возводимых по принципу I. Оно получено Г.П. Пустовойтом (Хрусталева, Пустовойт, 1988) для условий, когда глобальное изменение климата отсутствует. Это решение примем за основу (модельная задача). Ему будет соответствовать коэффициент надежности $K_{н,0}$ и цена риска $C_{R,0}$. В качестве оптимального решения при наличии глобального изменения климата примем такое решение, при котором цена риска не изменится. Очевидно, что для этого придется изменить коэффициент надежности. За-

дачу поставим так: найти коэффициент надежности K_H , при котором выполняется условие: $C_R \approx C_{R,0}$ (C_R – цена риска при наличии глобального изменения климата).

Вначале рассмотрим модельную задачу, когда глобальное изменение климата отсутствует.

Принимая во внимание, что $c_y(t) = 0$ при $t > t_3$, верхний предел определенного интеграла в выражении (6.5) заменим на t_3 и перепишем выражение для цены риска:

$$C_R(\gamma) = C_0(\gamma) \int_0^{t_3} \left(\frac{t}{t_3} - 1 - k_3 \right) \cdot (1 + E)^{-t} \cdot \frac{\partial P(t, \gamma)}{\partial t} \cdot dt = C_0(\gamma) \cdot R(\gamma). \quad (6.15)$$

Выражение (6.11) представим как функцию неизвестной характеристики безопасности γ :

$$C_0(\gamma) + C_R(\gamma) = \min. \quad (6.16)$$

Для поиска γ , соответствующего $\min$ левой части выражения (6.16), продифференцируем ее по γ и приравняем производную нулю. Предварительно (6.16) представим в виде:

$$C_0(\gamma) \cdot [1 + R(\gamma)] = \min, \quad (6.17)$$

$$\frac{C'_0(\gamma)}{C_0(\gamma)} = - \frac{R'(\gamma)}{1 + R(\gamma)}, \quad (6.18)$$

Решение (6.18) запишется (Хрусталева, Пустовойт, 1988):

$$\gamma = \sqrt{2 \cdot \ln \frac{(1 + 2 \cdot k_3) \cdot t_3}{5 \cdot \mathcal{E} \cdot v_{Fu}}} - 2 \cdot v_{Fu}, \quad (6.19)$$

где $\mathcal{E}$ – экономический коэффициент, равный C_{Fu}/C_F ; C_{Fu} – частное от деления стоимости фундамента C_ϕ на его несущую способность F_u ; C_F – частное от деления стоимости надфундаментной конструкции здания $C_{нф}$ на ее вес $G_{нф}$.

Выражение для вычисления экономического коэффициента имеет вид:

$$\mathcal{E} = \frac{C_\phi \cdot G_{нк}}{C_{нк} \cdot F_u^*}. \text{ Умножив числитель и знаменатель дроби на число фунда-}$$

$$\text{ментов } n, \text{ получим: } \mathcal{E} = \frac{C_\phi \cdot G_{нк} \cdot n}{C_{нк} \cdot F_u^* \cdot n} = \frac{C_\phi \cdot n}{C_{нк}} \cdot \frac{G_{нк} / n}{F_u^*} = \frac{\sum C_\phi}{C_{нк}} \cdot \frac{1}{K_{H,0}}, \quad (6.20)$$

где $\frac{\sum C_\phi}{C_{нк}}$ – отношение стоимости всех фундаментов к стоимости надфундаментной конструкции здания;

$\frac{G_{нк}}{n} = F^*$ – нагрузка на фундамент;

$K_{H,0} = \frac{F_u^*}{F^*}$ – оптимальный коэффициент надежности.

Получилась парадоксальная ситуация: чтобы вычислить оптимальный коэффициент надежности, надо знать этот коэффициент. В инженер-

ной практике такие задачи не редкость. Они решаются методом последовательных приближений. Для этого вначале надо задаться значением $K_{H,0}^*$, а затем с использованием формул (5.18) – (5.20), (5.22), (5.25) – (5.27), (5.41a), а также (6.19) и (6.20) вычислить этот коэффициент $K_{H,0}^{**}$ и соответствующую ему оптимальную надежность $P_0(t_3)$. Если значения $K_{H,0}^*$ и $K_{H,0}^{**}$ практически совпадают, вычисления заканчивают, в противном случае принимают новое значение $K_{H,0}^* \approx K_{H,0}^{**}$ и процедуру повторяют.

Расчеты $K_{H,0}$ и $P_0(t_3)$, выполненные по изложенной методике для зданий с открытыми вентилируемыми подпольями, показали следующее:

- Оптимальная надежность увеличивается, а оптимальный коэффициент надежности уменьшается с понижением температуры воздуха и увеличением глубины заложения фундаментов.
- Случайные колебания средней годовой температуры воздуха (флуктуации) оказывают на оптимальную надежность и оптимальный коэффициент надежности особенно большое влияние, с их увеличением значение первой величины снижается, второй – возрастает.
- С ростом стоимости надфундаментной конструкции здания (уменьшением отношения $\frac{\sum C_{\phi}}{C_{нф}}$) оптимальная надежность и оптимальный коэффициент надежности возрастают.

К сожалению, этот тривиальный вывод не находит отражения в действующих нормативных документах. Указанная зависимость для условий примера иллюстрируется графиком на рис. 6.2.

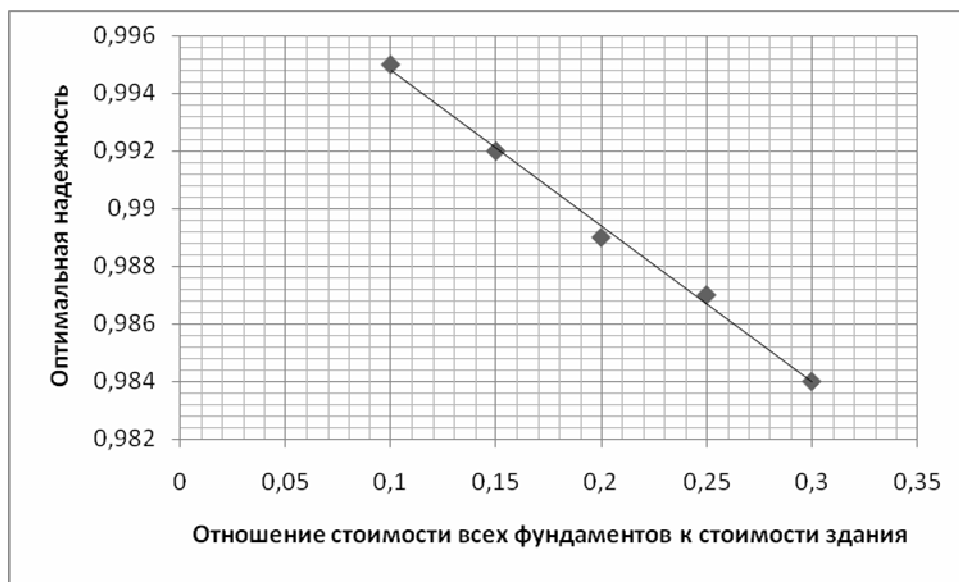


Рис 6.2 Зависимость оптимальной надежности от стоимости надфундаментной конструкции

После решения модельной задачи рассмотрим основную задачу, в

которой параметры $T_0' = f(T_{air})$, T_0 , D_{th} будут зависеть от времени и определяться глобальным изменением климата. Задачу поставим так – найти такой коэффициент надежности K_H и соответствующую ему надежность $P(t_3)$, при которых цена риска в основной задаче C_R будет практически равна цене риска в модельной задаче $C_{R,0}$ и, соответственно, их отношение $\frac{C_R}{C_{R,0}}$ близко к единице.

Перепишем выражение (6.7) с учетом выражений (6.9) и (6.10):

$$C_R = C_0 \cdot \sum K_0(k) \cdot m(k), \quad (6.21)$$

где
$$K_0(k) = \frac{1 - k / m + k_3}{(1 + E)^k}. \quad (6.22)$$

Откуда:
$$\frac{C_R}{C_{R,0}} = \frac{\sum_{k=1}^m K_0(k) \cdot m(k)}{\sum_{k=1}^m K_0(k) \cdot m_0}, \quad (6.23)$$

где k – текущий год с начала эксплуатации здания; m – число лет в периоде эксплуатации; $m(k)$ – интенсивность отказов в основной задаче, зависит от времени; m_0 – интенсивность отказов в модельной задаче, постоянная величина.

Решение нашей задачи ищем методом итераций, принимая за начальное значение $K_H = K_{H,0}$ и, увеличивая K_H в случае потепления климата и уменьшая его в случае похолодания, добиваемся равенства выражения (6.23) единице.

Последовательность расчетов для зданий с открытыми вентилируемыми подпольями на свайном фундаменте такова:

Вначале, допуская равенство температуры воздуха в открытом подполье температуре наружного воздуха, по нижеследующим формулам находим T_0' и D_{th} (Хрусталева, 2005):

$$\varphi = \frac{t_y}{2\pi} \cdot \arcsin(-T_{air} / A_{air}) \Rightarrow \Omega_s = T_{air} \cdot \left(\frac{t_y}{2} - 2 \cdot \varphi \right) + \frac{t_y}{2\pi} \cdot A_{air} \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{t_y} \cdot \varphi\right) + 1 \right] \Rightarrow$$

$$T_0' = T_{air} - \frac{\Omega_s}{t_y} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{th}}{\lambda_f} \right) \Rightarrow D_{th} = (1 + 0.0333 \cdot T_0') \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{th} \cdot \Omega_s}{L_v}}$$

где t_y – продолжительность года, 8760 ч.; λ_{th} – теплопроводность талого грунта слоя сезонного оттаивания, Вт/(м·°C); L_v – теплота оттаивания мерзлого грунта слоя сезонного оттаивания, Вт·ч/м³; остальные обозначения даны выше или имеют вспомогательное значение.

Затем следует цепочка вычислений по вышеприведенным формулам, а именно:

параметр k вычисляем по формуле (5.27) $\Rightarrow$ параметр α – по формуле (5.25) $\Rightarrow$ параметр T – по формуле (5.20) $\Rightarrow$ параметр R_{af} – по формуле (5.15)

$\Rightarrow$ параметр F_u^* и $F_{u,o}^*$ – по формуле (5.14) $\Rightarrow$ параметр $F^* = F_{u,o}^*/K_H \Rightarrow$ параметр y – по формуле (5.22) $\Rightarrow$ параметр D – по формуле (5.26) $\Rightarrow$ параметр ν_{Fu} – по формуле (5.19) $\Rightarrow$ параметр γ – по формуле (5.17) $\Rightarrow$ параметр γ_0 – по формуле (5.39) $\Rightarrow$ параметр $m(\gamma) = m(k)$ – по формуле (5.18) $\Rightarrow$ параметр $m(\gamma_0) = m_0$ – по формуле (5.18) при условии, что $\gamma_0 = \gamma \Rightarrow$ параметр $K_0(k)$ – по формуле (6.22) и далее произведение $K_0(k) \cdot m(k)$ и $K_0(k) \cdot m_0$. На этом расчеты в первом году эксплуатации оканчиваются. Далее проводятся аналогичные расчеты во 2-ом, 3-ем и т.д. году, включая последний год эксплуатации здания. Затем подсчитывается сумма $K_0(k) \cdot m(k)$ и $K_0(k) \cdot m_0$ за все годы эксплуатации и делится одно на другое. Если их отношение не равно единице, то назначается новое значение K_H и все расчеты повторяются, в противном случае по формулам $P(t_s) = \exp(-\sum_{i=1}^m m_i)$, и $P_0(t_s) = \exp(-t_s \cdot m_0)$ определяется надежность основания здания в случае основной и модельной задачи.

Расчеты не представляют трудности, если их выполнять на компьютере с помощью электронных таблиц Excel. Пример решения этой оптимизационной задачи приведен на рис. 6.3.

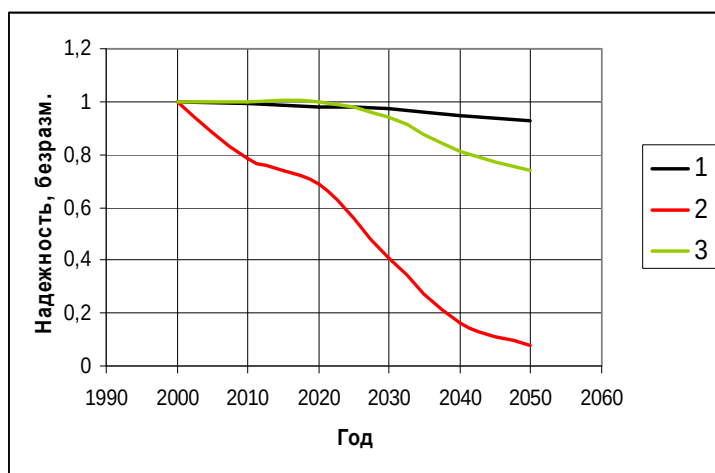


Рис. 6.3 Функция надежности основания здания с открытым вентилируемым подпольем на свайном фундаменте (длина свай 6 м) в г. Надым. 1 – $P_0(t)$; 2 – $P(t)$ при $K_{H,o}$; 3 – $P(t)$ при K_H

Из рассмотрения рисунка следует, что при оптимальном значении коэффициента надежности $K_{H,o} = 1,697$, если многолетних изменений температуры воздуха не происходит (модельная задача), функция надежности со временем меняется мало и надежность остается достаточно высокой (синяя кривая), в реальном же случае (основная задача) она интенсивно стремиться к нулю (красная кривая), достигая к концу эксплуатации значения 0,08. Это означает, что до окончания периода эксплуатации здание будет разрушено с вероятностью 92%. При коэффициенте надежности $K_H = 2,62$ (желтая кривая) надежность на начальном этапе превосходит надежность модельной задачи, а затем снижается до 0,73. При этом материальный

ущерб от снижения надежности остается таким же, как и в случае модельной задачи.

6.3. Использование результатов решения оптимизационной задачи при проектировании.

В настоящем разделе мы остановимся на возможностях использования результатов решения оптимизационной задачи в четырех практических случаях: расчет несущей способности свайного основания здания, возводимого на многолетнемерзлых грунтах с открытым вентилируемым подпольем; выбор планировочных решений населенных пунктов и способов фундаментостроения на многолетнемерзлых грунтах; выбор оптимального проектного решения взлетнопосадочной полосы на многолетнемерзлых грунтах; планирование инженерных изысканий в криолитозоне по результатам предварительных исследований. Рассмотрим их последовательно.

Вычисление коэффициента надежности для расчета свайного основания здания с открытым вентилируемым подпольем на многолетнемерзлых грунтах по первому предельному состоянию.

Выше нами было показано, что коэффициент надежности K_H в формуле (11) СНиП 2.02.04-85 однозначно связан с надежностью основания, которая трактуется как вероятность не наступления предельного состояния в течение периода эксплуатации здания. Это позволило установить связь между вероятностной и детерминистической задачами и, введя новый коэффициент надежности, продолжать пользоваться старыми нормированными детерминистическими методами расчета. Очевидно, что в отличие от старого директивного коэффициента надежности новый коэффициент должен не назначаться, а вычисляться на основе решения вероятностно-экономической задачи с учетом климатических изменений.

Методика этих вычислений изложена в предыдущем разделе. Здесь же мы остановимся на результатах вычислений.

Предварительно заметим, что при буроопускном способе погружения свай состав вмещающего грунта мало сказывается на несущей способности свайного основания, которая в основном определяется составом бурового раствора и его температурой. Если в качестве эталона принять один состав, например, известково-песчаный раствор, то несущая способность будет определяться только климатическими условиями района строительства, что позволяет распространить результаты наших вычислений на целые регионы, представленных метеостанциями, на которых имеются ряды наблюдений за температурой воздуха и грунта. Нами были проведены расчеты для 18 метеостанций, расположенных в Западной, Средней и Восточной Сибири применительно к эталонному зданию. Эталонное здание имеет

ширину 12 м, открытое вентилируемое подполье и возводится на свайном фундаменте на многолетнемерзлых грунтах сливающегося типа. Глубина погружения свай в грунт составляет 6 м, 8 м, 10 м и 12 м. Сваи железобетонные сечением 0,3×0,3 м. Отношение стоимости всех свайных фундаментов к стоимости надфундаментной конструкции здания составляет 0,3. Результаты расчета представлены в табл. 6.1

На основе данных табл. 6.1 построено 4 схематических карты распределения K_H по территории Западной, Средней и Восточной Сибири криолитозоны России (рис. 6.4 – 6.7). Карты построены методом интерполяции данных расчетов K_H в пределах каждой климатической зоны рассматриваемой территории. Это обусловлено тем, что, как мы отмечали выше, вариации K_H в основном определяются вариациями климата. Из рассмотрения карт следует, что наибольшие значения K_H соответствуют тем районам, где отмечаются наибольшие тренды среднегодовой температуры воздуха и наиболее высокие температуры многолетнемерзлых грунтов. Это центральные и южные районы Восточной Сибири и южные районы Западной Сибири. При этом с увеличением глубины погружения свай значения K_H уменьшаются, что объяснимо, поскольку температурная волна с глубиной затухает. Отсюда следует важный практический вывод: меньшее количество глубоких свай всегда предпочтительнее большему количеству мелких, хотя с точки зрения производства работ такое решение может являться и не оптимальным и это надо учитывать при проектировании.

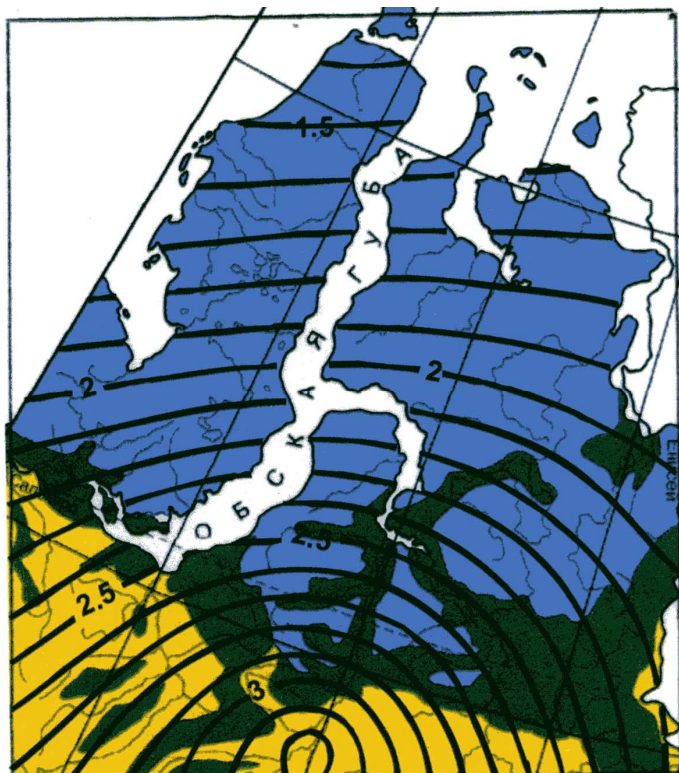
Итак, наличие карт K_H позволяет совместить вероятностные методы расчета с детерминистическими и при этом еще учесть климатические изменения. Практически это означает, что расчеты оснований зданий по первому предельному состоянию (по несущей способности) следует осуществлять по формулам СНиП 2.02.04-85, где коэффициент надежности принимать по картам изолиний K_H . Однако следует помнить, что карты распространяются только на здания шириной 12 м с открытыми вентилируемыми подпольями и свайными фундаментами, погружаемыми в грунт буропускным способом, и охватывают период с 2010 по 2060 гг.

Таблица 6.1

Результаты вычисления оптимального коэффициента надежности K_H с учетом климатических изменений и оптимального коэффициента надежности $K_{H,0}$ без учета климатических изменений

Название метеостанции	Местоположение		Длина свай 6 м		Длина свай 8 м		Длина свай 10 м		Длина свай 12 м	
	Широта, град	Долгота, град	K_H	$K_{H,0}$	K_H	$K_{H,0}$	K_H	$K_{H,0}$	K_H	$K_{H,0}$
Западная Сибирь										
о. Белый	73,3	70,7	1,32	1,33	1,23	1,24	1,17	1,18	1,13	1,14
Марре-Сале	69,7	66,8	1,65	1,53	1,50	1,37	1,39	1,27	1,33	1,21
Салехард	66,6	66,6	1,93	1,57	1,66	1,39	1,51	1,29	1,41	1,22
Туруханск	65,9	88,1	2,15	1,77	1,85	1,55	1,66	1,40	1,54	1,30
Надым	65,6	72,5	2,63	1,39	2,22	1,28	1,97	1,21	1,79	1,16
Тарко-Сале	64,9	77,8	3,26	1,88	2,45	1,59	2,06	1,43	1,81	1,32
Полуй	66,0	68,7	2,40	1,56	1,98	1,39	1,75	1,29	1,62	1,23
Средняя и Восточная Сибирь										
Саскылах	71,9	114,1	1,27	1,24	1,20	1,17	1,15	1,13	1,14	1,11
Тикси	71,7	128,7	1,37	1,19	1,29	1,14	1,24	1,11	1,21	1,09
Чокурдах	70,7	147,9	1,23	1,15	1,17	1,11	1,15	1,09	1,12	1,07
Верхоянск	67,5	133,3	1,39	1,21	1,30	1,16	1,24	1,12	1,21	1,10
Оймякон	63,3	143,2	1,15	1,11	1,13	1,09	1,11	1,07	1,10	1,06
Мирный	62,5	114,0	2,98	1,50	2,77	1,37	2,53	1,28	2,32	1,22
Туой-Хая	62,5	111,2	2,90	1,54	2,62	1,41	2,40	1,32	2,20	1,25
Якутск	62,1	129,5	3,42	1,39	3,07	1,29	2,76	1,22	2,49	1,17
Усть-Мая	60,4	134,5	1,82	1,22	1,68	1,16	1,59	1,12	1,55	1,10
Витим	59,5	112,6	2,79	1,65	2,48	1,48	2,23	1,36	2,05	1,28
Чульман	56,8	124,9	2,95	1,17	2,75	1,12	2,63	1,09	2,54	1,07

А



Б

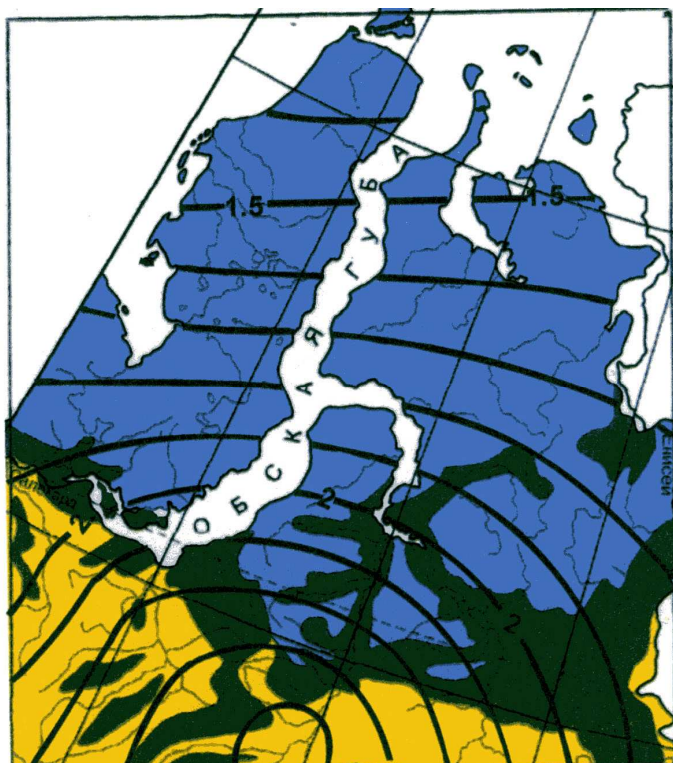
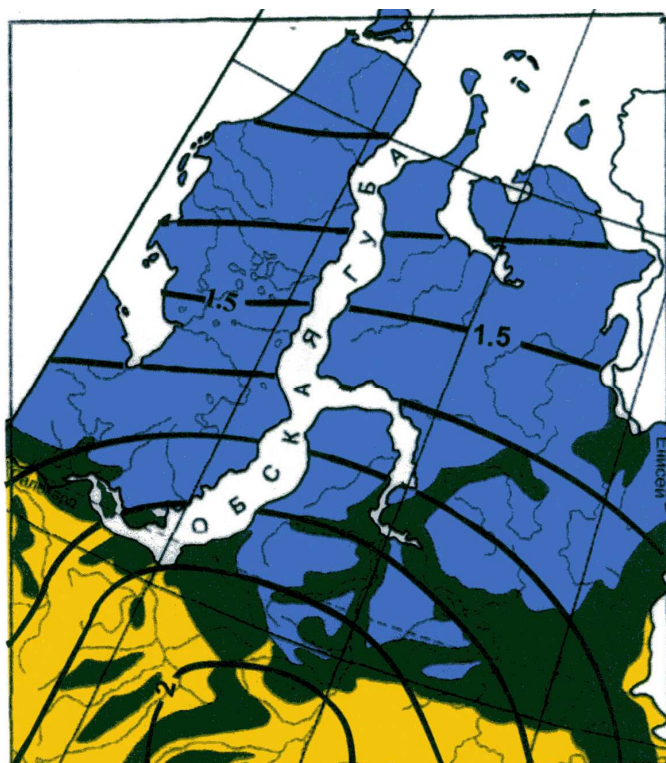


Рис. 6.4 Карта изолиний K_n на территории Западной Сибири: цветом показаны геокриологические зоны (расшифровка обозначений на рис. 4.14); значения коэффициента K_n : А – при погружении свай в грунт 6 м; Б – при погружении свай в грунт 8 м

А



Б

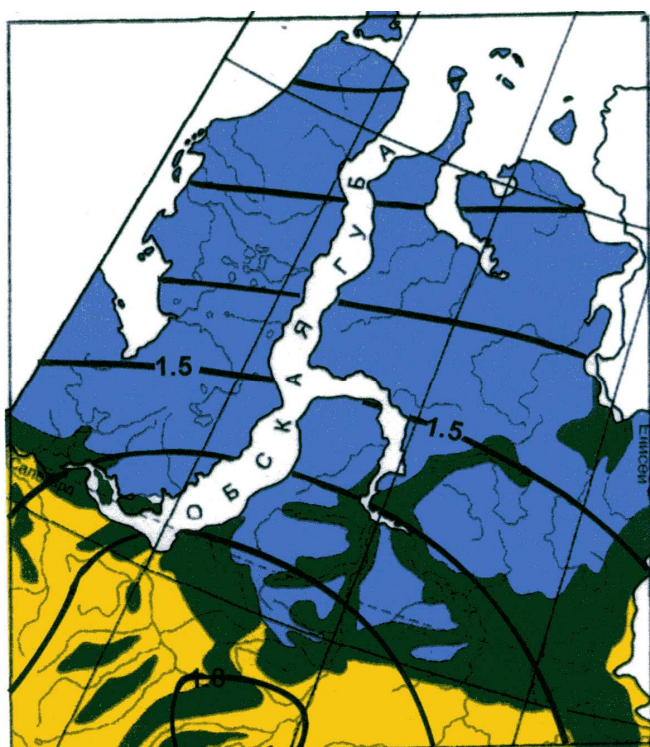
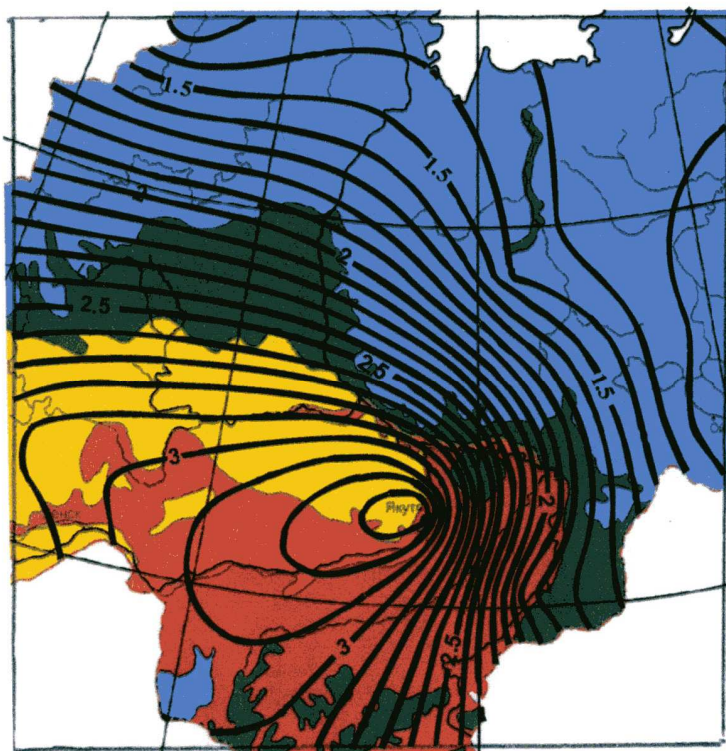


Рис. 6.5 Карта изолиний K_n на территории Западной Сибири: цветом показаны геокриологические зоны (расшифровка обозначений на рис. 4.14); значения коэффициента K_n : А – при погружении свай в грунт 10 м; Б – при погружении свай в грунт 12 м

А



Б

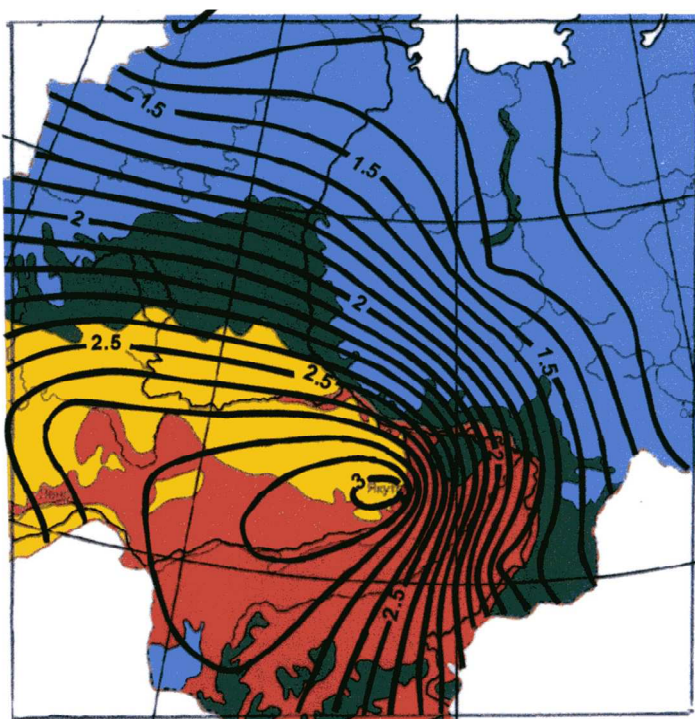
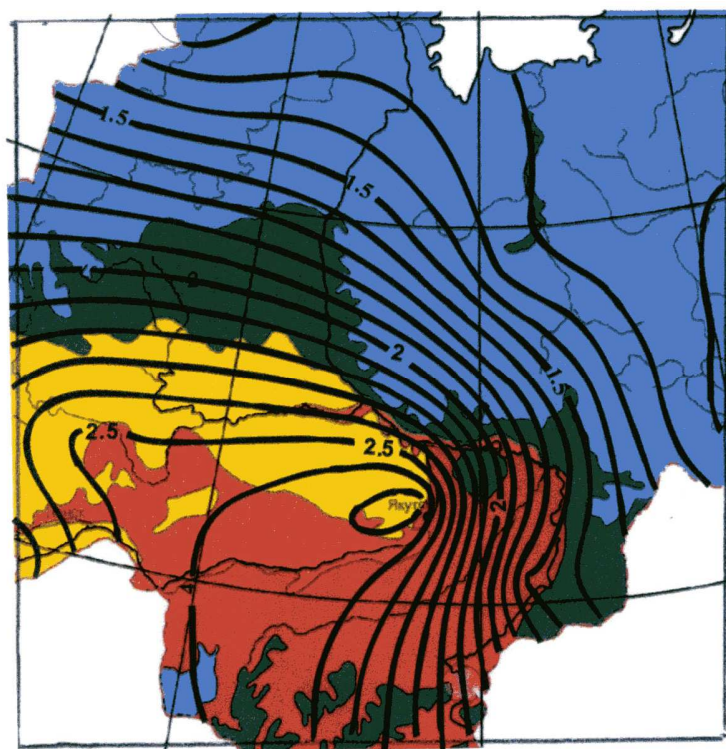


Рис. 6.6 Карта изолиний K_n на территории Средней и Восточной Сибири: цветом показаны геокриологические зоны (расшифровка обозначений на рис. 4.15); значения коэффициента K_n : А – при погружении свай в грунт 6 м; Б – при погружении свай в грунт 8 м

А



Б

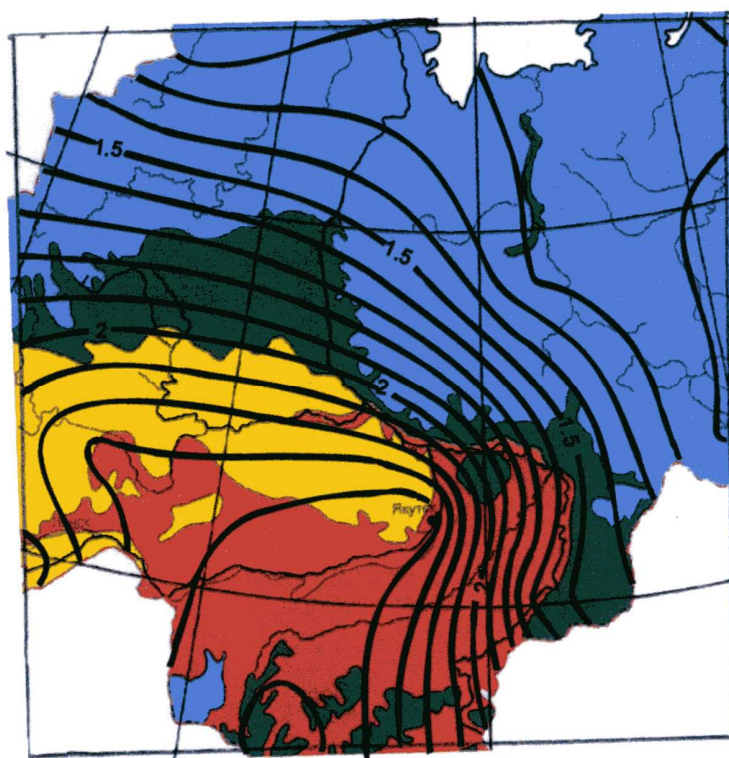


Рис. 6.7 Карта изолиний K_n на территории Средней и Восточной Сибири: цветом показаны геокриологические зоны (расшифровка обозначений на рис. 4.15); значения коэффициента K_n : А – при погружении свай в грунт 10 м; Б – при погружении свай в грунт 12 м

Выбор планировочных решений населенных пунктов и способов фундаментостроения на многолетнемерзлых грунтах.

Оптимальное планировочное решение застройки выбирают по минимуму суммарной приведенной стоимости из нескольких вариантов планировочных решений равнозначных с точки зрения архитектурной выразительности и функционального назначения. При этом расчет стоимости нулевого цикла осуществляют для каждого первичного элемента застройки (ПЭЗ), представляющего собой группу зданий, возводимых по единому принципу. Расчет осуществляют с использованием компьютерной программы NAST и построения специальной номограммы, подобной той, которая показана на рис. 6.1. Стоимость варианта планировки получают суммированием стоимостей ПЭЗ, входящих в вариант. Напомним, что ПЭЗ объединяет только однотипные здания, возводимые по одному принципу, в частном случае это может быть одно здание.

Если ПЭЗ попадает на несколько участков с различными грунтовыми разрезами, то построение номограммы и поиск оптимальной точки на ней следует производить для каждого разреза в отдельности. Далее находят средневзвешенную по площади и стоимости надежность P^* , используя формулу (6.24), и затем минимальную стоимость C^* в пределах изолинии P^* . Этой точке на номограмме соответствуют и управляющие параметры: глубина погружения свай l^* и глубина предпостроечной подготовки основания (искусственного промораживания или оттаивания грунтов) H^* . Суммируя C^* по всем участкам определяют общую стоимость ПЭЗ (формула 6.25).

$$P^* = \sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i \cdot L_i / \sum_{i=1}^n C_i \cdot L_i, \quad (6.24)$$

$$C_{\text{ПЭЗ}} = \sum_{i=1}^n C_i^* \cdot L_i / \sum_{i=1}^n L_i, \quad (6.25)$$

где n – число участков с различными грунтовыми разрезами в пределах ПЭЗ; P_i , C_i – надежность и приведенная суммарная стоимость нулевого цикла здания, соответствующая оптимальной точке на номограмме, построенной для i -го участка; L_i – протяженность ПЭЗ в пределах i -го участка.

Такой алгоритм решения принципиальных трудностей не содержит, но связан с большим объемом вычислений, число которых уменьшается, если застройка ведется однотипными зданиями. Для этого случая мы рекомендуем предварительно построить стоимостную инженерно-геокриологическую карту.

Наши исследования показывают, что основными мерзлотно-грунтовыми условиями, определяющими пространственную изменчивость стоимости, являются:

– глубина залегания кровли коренных пород;

- разрез рыхлых отложений;
- глубина залегания верхней границы ММГ;
- температура ММГ у подошвы слоя годовых теплооборотов.

Для построения стоимостной инженерно-геокриологической карты необходимо, пользуясь перечисленными параметрами (классификационными признаками), расчленить застраиваемую территорию на участки, далее для каждого участка построить номограмму и определить на ней минимальную стоимость строительства здания по первому и второму принципам, которую затем отобразить в границах участка. Здесь же следует отобразить соответствующие минимальной стоимости надежность основания, глубину заложения фундамента и глубину предварительного промораживания или оттаивания грунтов.

Глубина предварительного промораживания принимается равной нулю на участках с ММГ сливающегося типа и глубине залегания верхней границы ММГ (H_0) на участках с ММГ не сливающегося типа.

Глубина предварительного оттаивания принимается равной H , если $H > H_0$, и равной нулю, если $H \leq H_0$. Условные обозначения указаны в начале главы.

Накладывая на карту возможные варианты архитектурно-планировочных решений застройки и суммируя стоимости в пределах ПЭЗ по формуле (6.25), легко выбрать оптимальные по стоимости принцип использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований и способ фундаментостроения. При этом следует помнить, что ПЭЗ, возводимые по принципу I, должны отделяться от ПЭЗ, возводимых по принципу II, полосой безопасности, ширина которой назначается расчетом.

Таким образом, на основе стоимостной карты для каждого ПЭЗ устанавливаются:

- принцип использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания;
- глубина заложения фундаментов;
- глубина предварительного промораживания или оттаивания грунтов;
- надежность основания;
- приведенная стоимость нулевого цикла здания.

Суммируя стоимости ПЭЗ, можно оценить общую стоимость вариантов архитектурно-планировочного решения и выбрать вариант, соответствующий минимальной стоимости.

Поясним изложенное примером построения и использования стоимостной инженерно-геокриологической карты.

Предположим, что территорию в районе г. Воркута размером в плане 400×600 м планируется застроить типовыми крупнопанельными 5-ти этажными зданиями серии 1-335 А на свайном фундаменте. Возможны два варианта архитектурно-планировочных решений (рис. 6.8). Мерзлотно-грунтовые условия показаны на карте (рис. 6.9). Остальные параметры

приведены в примере расчета, приведенного в работе (Хрусталева, Пустовойт, 1988). Требуется построить стоимостную инженерно-геокриологическую карту территории застройки и по ней установить принцип строительства для каждого ПЭЗ, а также выбрать оптимальный по стоимости вариант архитектурно-планировочного решения.

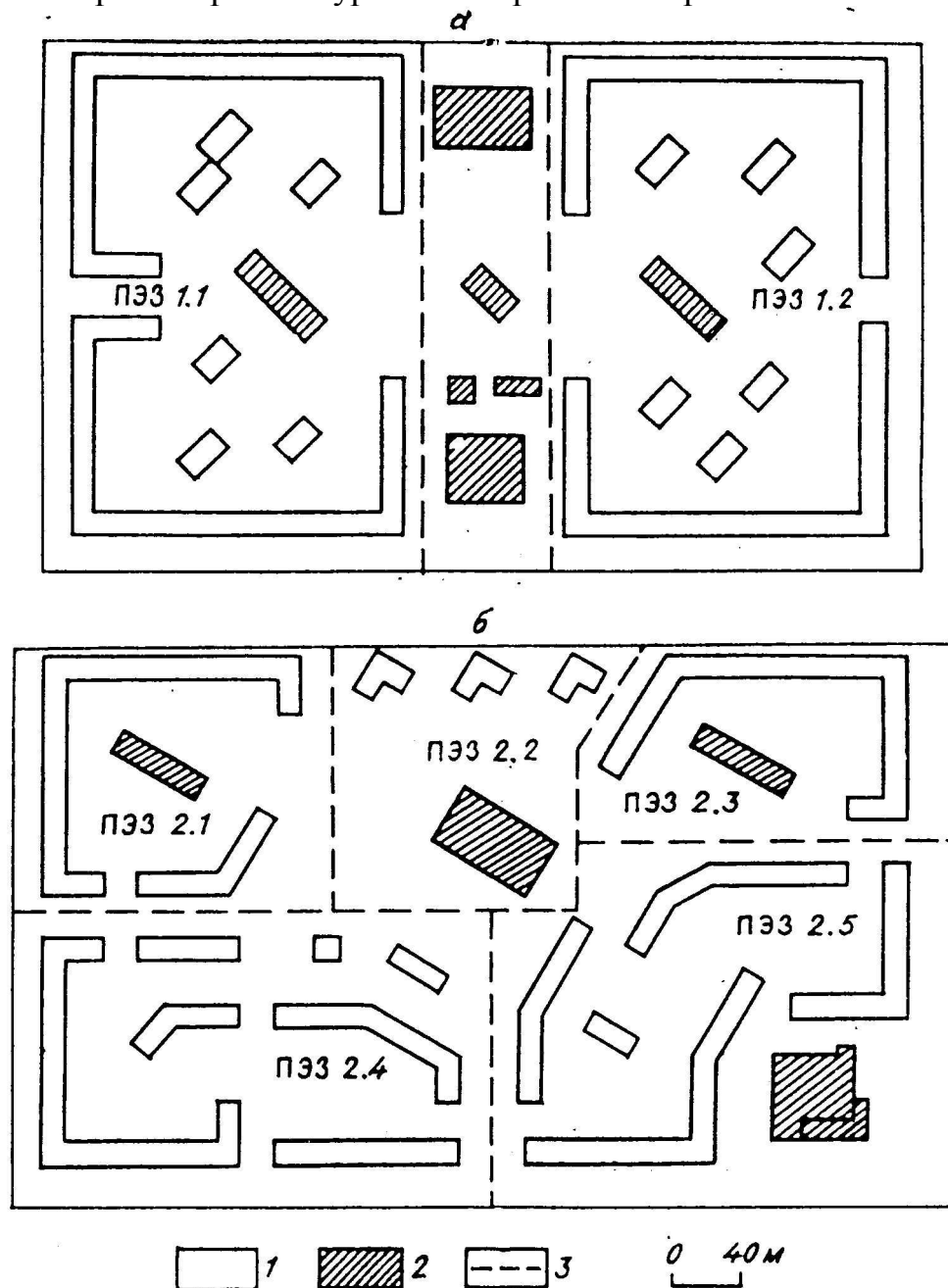


Рис. 6.8 Первый (а) и второй (б) варианты архитектурно-планировочного решения застройки.

1 – жилые здания; 2 – здания социально-культурного назначения;
3 – границы первичных элементов застройки (ПЭЗ)



Среднегодовая температура и условия залегания ММГ:

173

Для решения этой задачи по классификационным признакам расчленим территорию на семь участков и для каждого по программе NAST рассчитаем надежность и приведенную суммарную стоимость. Затем построим семь номограмм (по числу участков), одна из них показана на рис. 6.1. в поле номограмм найдем оптимальные точки, информацию о них покажем на карте. Совокупность этих отображений вместе с информацией о мерзлотно-грунтовых условиях и составит стоимостную инженерно-геокриологическую карту (см. рис. 6.9). Далее на эту карту наложим варианты архитектурно-планировочных решений застройки (см. рис. 6.8) и определим протяженность всех ПЭЗ в пределах каждого участка. Это позволит затем, применяя формулы (6.24) и (6.25) и расчетные номограммы, вычислить стоимость нулевого цикла каждого ПЭЗ при его строительстве по принципу I и II.

Сводные результаты расчетов по всем ПЭЗ для заданных двух вариантов архитектурно-планировочных решений приведены в табл.6.2.

Таблица 6.2

Надежность оснований и суммарная приведенная стоимость нулевого цикла ПЭЗ

Вариант планировки	Номер ПЭЗ	Протяженность ПЭЗ, м	Значения параметров системы «здание – основание»			
			Принцип I		Принцип II	
			Надежность, дол. ед.	Стоимость, %	Надежность, дол. ед.	Стоимость, %
1	1.1	1190	0,996	31,9	0,715	25,9
	1.2	1014	0,998	29,2	0,712	39,8
2	2.1	386	0,997	34,6	0,742	41,9
	2.2	144	0,994	25,9	0,700	48,2
	2.3	338	0,998	25,1	0,712	44,3
	2.4	700	0,995	27,2	0,707	45,7
	2.5	680	0,998	32,6	0,737	29,4

Из табл. 6.2 следует, что принцип I целесообразно использовать при застройке ПЭЗ 1.2; ПЭЗ 2.1; ПЭЗ 2.2; ПЭЗ 2.3; ПЭЗ 2.4; принцип II – ПЭЗ 1.1; ПЭЗ 2.5. При этом общая стоимость строительства нулевого цикла зданий по первому варианту архитектурно-планировочного решения составила 27,4% стоимости надфундаментных конструкций, а по второму – 28,7 %.

Таким образом, с точки зрения устройства оснований и фундаментов предпочтителен первый вариант рассмотренных нами архитектурно-планировочных решений, его и следует реализовать. Для этого варианта в

табл. 6.3 приведены значения управляющих параметров системы «здание – основание».

Таблица 6.3

Значения управляющих параметров системы «здание – основание»

№ ПЭЗ	Принцип строительства	Модуль вентил. подполья	Номер участка на стоимостной карте													
			2.1		1.1		1.2		1.3		1.4		1.5		1.6	
			I^* м	H^* м	I^* м	H^* м	I^* м	H^* м	I^* м	H^* м	I^* м	H^* м	I^* м	H^* м	I^* м	H^* м
1.1	II	$5 \cdot 10^{-4}$	11	14	2	-	8	12	8	12	8	12	7	15	7	18
1.2	I	0.025	-	-	6	2	6	2	6	2	6	2	6	2	6	2

Необходимо отметить, что предлагаемая методика стоимостной оценки территории априорно допускает равенство затрат на инженерную подготовку территории (вертикальную планировку, прокладку инженерных сетей и транспортных магистралей при всех вариантах архитектурно-планировочных решений и принципах использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований. Поэтому эти затраты в сравнительной оценке не участвуют. Такое допущение справедливо в том случае, когда застраиваемая территория имеет пологий рельеф и протяженность инженерных сетей и транспортных магистралей во всех вариантах одинаковы. В общем случае эти затраты будут различны. Неодинакова их роль и формирования начальной стоимости застройки и цены риска, что, очевидно, повлияет на выбор оптимального проектного решения.

Оценка инженерной подготовки территории как одной из составляющих начальной стоимости сегодня не вызывает затруднений. Для этого достаточно, пользуясь нормативными указаниями, подсчитать объемы и стоимость подготовки по каждому из вариантов. Что касается учета инженерной подготовки в формировании цены риска, то это сделать пока не представляется возможным, так как нужно сформулировать и решить комплексную стохастическую задачу, касающуюся теплового и механического взаимодействия с многолетнемерзлыми грунтами как самих зданий, так и всех элементов инженерного обустройства территории. Постановка такой задачи и ее решение – дело будущего.

Выбор высотной отметки взлетнопосадочной полосы на многолетнемерзлых грунтах

Сначала рассмотрим идеальный случай, когда в пределах всей полосы рельеф абсолютно плоский, а мерзлотно-грунтовые условия однородны.

В этом случае целесообразно принять в качестве управляющих параметров высотную отметку поверхности полосы (красную отметку) ∇ и толщину теплоизолирующей насыпи h (верхняя часть насыпи, отсыпаемая крупно-скелетным грунтом). Эти два параметра определяют объем вертикальной планировки, а, следовательно и ее стоимость, которая со стоимостью покрытия определяют начальную стоимость полосы. Определяя цену риска, предположим, что при отказе основания (осадка или пучение превосходят предельные значения для выбранного типа покрытия) покрытие полосы приходит в негодность и подлежит замене. Задача решается методом Монте-Карло по программе RW. Программа каждый отказ умножает на стоимость замены покрытия и коэффициент приведения разновременных затрат и получает стоимость одного отказа, т.е. ущерб от одного отказа. Сумма всех ущербов, деленная на число испытаний, есть цена риска. Далее программа, суммируя цену риска с начальной стоимостью, получает суммарную приведенную стоимость, соответствующую заданной паре управляющих параметров ∇ и h . Варьируя управляющими параметрами, находим минимум суммарной стоимости – это и есть оптимальное решение. На рис. 6.12 показан поиск решения применительно к одному из участков взлетно-посадочных полос в районе города Якутск.

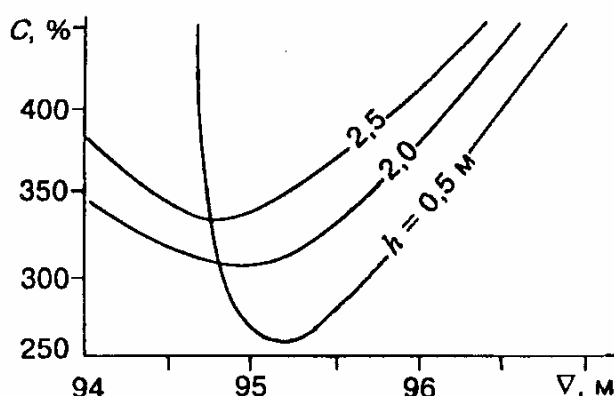


Рис. 6.10 Зависимость суммарной приведенной стоимости однородного участка взлетно-посадочной полосы C (в % от стоимости покрытия от высотной отметки ее поверхности ∇ и толщины теплоизолирующего слоя h)

Рассмотрим теперь реальный случай, сведя его к сумме идеальных. Для этого, используя метод перекрестного районирования, разобьем полосу длиной L на сумму участков с относительно плоским рельефом и однородно-грунтовыми условиями, например, так, как это сделано для полосы в районе Якутска (рис. 6.11). Затем создадим профиль полосы так, чтобы он максимально возможно повторял рельеф при условии, что уклоны не превышают допустимых. Будем перемещать профиль полосы вверх-вниз, добиваясь минимума общей суммарной стоимости по всем участкам с учетом длины каждого. Варьируя красной отметкой начала полосы (красные отметки участков определяются профилем) и толщиной теплоизолирующей насыпи на каждом участке находим оптимальное решение (рис. 6.12).

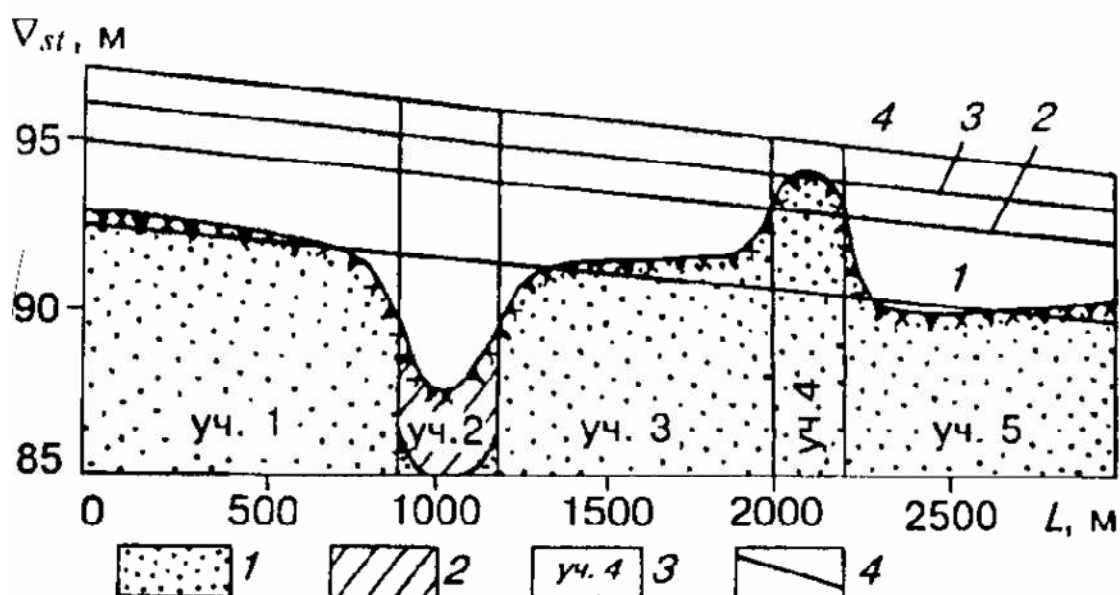


Рис. 6.11 Геологический разрез взлетнопосадочной полосы с выделением однородных участков и 4-х вариантов профиля.

1 – мелкий песок; 2 – суглинок; 3 – номер участка; 4 – вариант профиля;
 ∇_{st} – высотная отметка начала полосы

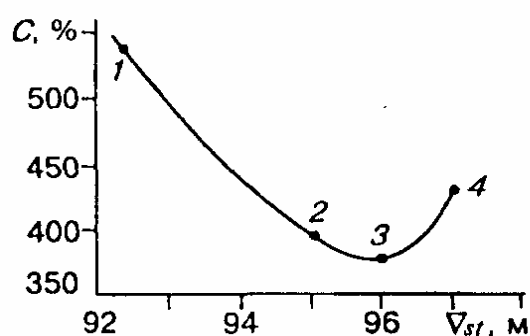


Рис. 6.12 Зависимость суммарной приведенной стоимости взлетно-посадочной полосы C (в % от стоимости покрытия) от высотной отметки начала полосы ∇_{st}

Планирование инженерных изысканий в криолитозоне по результатам предварительных исследований.

Неоднородность и изменчивость инженерно-геокриологических условий могут быть оценены только по результатам ранее выполненных (предварительных) исследований, поскольку изыскания не имеют обратной связи с проектированием. Предварительными мы называем изыскания или исследования, выполненные на предыдущей стадии инженерных изысканий. В частности, для изысканий на стадии «проект», рассмотрением которых мы ограничимся, предварительными являются изыскания на стадии «обоснования инвестиций в строительство». Целью планирования изысканий является решение четырех последовательных задач: установить

место изысканий, состав изысканий, глубину опробования грунтов, площадь изысканий.

Для решения этих задач составляется стоимостная инженерно-геокриологическая карта. Методика составления карты описана выше. Отличие этой карты от карты, приведенной на рис. 6.9, заключается лишь в том, что на ней вместо общих затрат C_i отображаются удельные затраты, связанные с общими следующим соотношением:

$$c_i = C_i \cdot p / S_{зд}, \quad (6.26)$$

где p – плотность застройки (отношение площади, занимаемой зданиями, к общей площади застройки; $S_{зд}$ – площадь, занимаемая одним зданием).

Выделенные на стоимостной карте с минимальной стоимостью освоения, казалось бы, и могут быть рекомендованы для последующих изысканий. Однако это сделать нельзя по следующей причине. Стоимость освоения как интегральный показатель инженерно-геокриологических условий и конструктивных особенностей зданий вбирает в себя большое число стохастических параметров и сама является стохастической величиной с примерно нормальным законом распределения. Поэтому говорить о различии стоимостей можно только в статистическом смысле, а именно оценивая степень различия между их однородными и независимыми группами. Статистическая группировка стоимостей может быть выполнена с использованием критерия Диксона (*Комаров, 1972*). Для этого все стоимости участков (из стоимостей, относящихся к I-му и ко II-му принципам использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований, выбирается наименьшая) располагают в виде возрастающего ряда и рассчитывают критерий отбраковки последнего члена этого ряда c_n по формуле:

$$Д = \frac{c_1 - c_2}{c_1 - c_n}, \quad (6.27)$$

Если вычисленное значение критерия меньше предельного, соответствующего заданной доверительной вероятности, то этот член ряда отбраковывается. Операция повторяется до выделения группы низких значений стоимости. Эта группа участков принимается в качестве территории, перспективной для освоения, где и рекомендуется проводить инженерные изыскания. Так решается вопрос о местоположении изысканий. При этом возможны два варианта группировки: 1) в пределах выделенной группы участков с минимальной стоимостью строительство рекомендуется только по одному принципу (первому или второму); 2) в пределах выделенной группы участков с минимальной стоимостью строительство рекомендуется по обоим принципам.

В первом случае вопрос о составе изысканий и глубине опробования решается однозначно. Если рекомендуется первый принцип, то глубина опробования определяется глубиной заложения подошвы фундамента (l) плюс мощность сжимаемой толщи (1-2 м), но не менее 10 м, где согласно

требованиям норм должна измеряться температура многолетнемерзлого грунта. Если рекомендуется второй, то глубина опробования должна быть не менее максимальной глубины предварительного оттаивания (H) плюс 3-4 м. Состав изысканий также нормируется в соответствии с принципами использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований. При первом принципе основное внимание уделяется исследованию прочностных свойств грунта, при втором – деформационным.

Во втором случае принимается максимальная из перечисленных глубина опробования, а состав изысканий соответствует обоим принципам.

Так решается задача о составе инженерных изысканий и глубине инженерно-геологического опробования.

Следующей задачей является определение оптимальной по стоимости площади инженерных изысканий. Очевидно, что с увеличением площади инженерных изысканий вероятность нахождения участка с минимальными удельными затратами на строительство будут возрастать, стремясь к единице при площади равной суммарной площади участков выделенной группы, и соответственно стоимость освоения будет снижаться. С другой стороны, с увеличением площади изысканий будут увеличиваться затраты на проведение изысканий. Возникает оптимизационная задача, из решения которой может быть найдена необходимая площадь изысканий:

$$C_{\text{стр}}(S_{\text{из}}) + C_{\text{из}}(S_{\text{из}}) \rightarrow \min, \quad (6.28)$$

где $C_{\text{стр}}(S_{\text{из}})$ – стоимость освоения территории, зависящая от площади изысканий $S_{\text{из}}$; $C_{\text{из}}(S_{\text{из}})$ – затраты на производство изысканий, зависящие от площади изысканий $S_{\text{из}}$.

Зависимость стоимости изысканий от их площади устанавливается в соответствие с требованиями нормативов, и ее определение проблемы не вызывает. Что касается зависимости стоимости освоения от площади изысканий, то здесь дело обстоит значительно сложнее. Она может быть найдена из решения одной из задач теории исследования операций, а именно – задачи о принципах выбора рационального решения в случае, когда условия выполнения операции заранее неизвестны и могут варьироваться.

В нашем случае под операцией следует понимать установление размеров участка изысканий, под условиями выполнения операции – местоположение этого участка в пределах перспективной для освоения территории, а под эффективностью операции – удельную стоимость освоения территории.

Решение задачи запишется (Вентцель, 1964):

$$c_i^* = \sum_{j=1}^n P_j c_{ij}, \quad (6.29)$$

где c_i^* – средняя эффективность i -ой операции; n – число возможных условий; P_j – вероятность выполнения j -го условия; c_{ij} – эффективность i -ой

операции при j -ом условии.

Значение c_{ij} обычно помещают в таблицу, которую называют матрицей эффективности. Для получения такой матрицы разбивают площадь перспективной для освоения территории на модули, равные площади застройки и подсчитывают удельную стоимость строительства в пределах каждого модуля u_k . Подсчет u_k осуществляется осреднением удельных затрат на застройку участков, попадающих в контуры k -го модуля, с учетом перекрываемой им площади.

Далее сформулируем операции. В первой операции примем границы участка изысканий, совпадающими с границами модуля, тогда удельная стоимость освоения будет равна: $c_{ij} = u_j$.

Во второй операции укрупним площадь изысканий объединением двух смежных модулей и в качестве удельной стоимости строительства примем минимум из удельных стоимостей двух объединенных модулей, т.е. $c_{ij} = \min(u_{2j-1}, u_{2j})$. В третьей операции – трех смежных модулей, тогда $c_{ij} = \min(u_{3j-2}, u_{3j-1}, u_{3j})$ и т.д. до тех пор, пока участок изысканий не будет равен всей площади изысканий на предварительной стадии.

Получив матрицу эффективности, по формуле (6.29), подсчитаем среднюю эффективность операции c_i^* , принимая $P_j = 1/n$, так как условия выполнения операции равновероятны (местоположение участков изысканий выбирается произвольно) и далее перемножением c_i^* на площадь застройки определяем искомую стоимость строительства $C_{стр}$ как функцию площади изысканий $S_{из}$. Эту функцию затем подставим в уравнение (6.28), из которого найдем оптимальное значение площади изысканий.

Так решается задача об определении площади инженерных изысканий.

Предлагаемый подход к планированию инженерных изысканий был осуществлен при разработке технического задания на проведение инженерных изысканий на стадии «проект» территории размещения одного из рабочих поселков вблизи железнодорожной магистрали Беркакит – Якутск (Хрусталева, Козлов, 1990). В основу планирования были положены результаты исследований инженерно-геокриологических условий этой территории, выполненных в 1986 г экспедицией кафедры геокриологии геологического факультета МГУ.

Поселок 1000 жителей площадью 7 га застраивался 5-ти этажными зданиями серии 122 со стоимостью надфундаментной конструкции 1054 тыс. руб. (в ценах 1982 г). Размер здания в плане $13,3 \times 100$ м. Плотность застройки 0,19. Территория строительства расположена в криолитозоне, в центральной части Ленно-Алданского плато. Предварительными изысканиями изучено $3,5 \text{ км}^2$ этой территории. Мерзлотно-геологические условия размещения поселка весьма неоднородны, что существенно затрудняет выбор перспективных для строительства участков. Так, весьма разнооб-

разно литологическое строение разреза юрских пород, в большом интервале меняется глубина залегания монолитных скальных пород.

По совокупности литологического и криогенного строения верхней части разреза пород, глубине залегания скальных пород, средней годовой температуре многолетнемерзлых толщ было выделено 12 инженерно-геологических участков (табл. 6.4, рис. 6.13), для которых выполнен по программе NAST расчет стоимости строительства нулевого цикла здания.

Таблица 6.4

Краткая характеристика инженерно-геологических участков

Номер инж-геол. участка	Строение верхней части разреза пород	Глубина залегания известняков, м	Льдистость верхней части разреза мерз пород, д.е.	Среднегодовая температура пород, °С
1	Элювиальные пески и супеси мощностью 1-1,5 м, залегающие на песчаниках нижней юры	50 – 60	0,03 - 0,08	от -0,5 до -1,0
2		40 – 50	0,03 – 0,08	от -1,0 до -1,5
3	Элювиально-делювиальные пески, супеси и суглинки мощностью 1-1,5 м, залегающие на песчаниках, конгломератах, галечниках и глинах нижней юры	30 – 40	0,08 – 0,15	от -1,0 до -1,5
4		20 – 30	0,03 – 0,04	от -0,5 до -1,0
5		20 – 30	0,08 – 0,15	от -1,0 до -1,5
6		20 – 30	0,08 – 0,15	от -1,5 до -2,0
7		10 – 20	0,08 – 0,15	от -1,0 до -1,5
8		10 – 20	0,08 – 0,15	от -1,5 до -2,0
9		1,5 – 10	0,08 – 0,15	от -1,0 до -1,5
10		1,5 – 10	0,08 – 0,15	от -1,5 до -2,0
11	Делювиально-десерпционные крупнооломочные отложения мощностью до 1 м, перекрывающие кембрийские известняки	до 1	0,03 – 0,08	от -1,5 до -2,0
12	Делювиально-пролювиальные супеси и суглинки мощностью 6-7 м, залегающие на кембрийских известняках	10	0,15 – 0,40	от -2,0 до -4,0

При расчетах поиск оптимального решения осуществлялся перебором управляющих параметров применительно к двум принципам использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований и трем типам фундаментов (свайный, столбчатый и из перекрестных лент) разного размера. Удельные затраты на строительство рассчитывались по формуле (6.26) для минимальных значений стоимости. Результаты расчетов приве-

дены в табл. 6.5. Здесь же указаны тип и глубина заложения фундамента, соответствующие минимальной стоимости.

Таблица 6.5

Стоимость строительства нулевого цикла здания на разных инженерно-геологических участках

Номер инженерно-геологического участка	Строительство по принципу I			Строительство по принципу II			
	Тип фундамента	Глубина заложения фундамента, м	Стоимость строительства руб/м ²	Тип фундамента	Глубина предварительного оттаивания грунта, м	Глубина заложения фундамента, м	Стоимость строительства руб/м ²
1	свайный	8	44,9	столбчатый	50	3	352,4
2		7	42,5	свайный	43	3	259,8
3		10	50,0		33	14	169,1
4		8	45,4	столбчатый	23	3	79,5
5		10	49,3		23	3	83,9
6		8	45,4		23	3	85,0
7		7	42,1		13	3	37,9
8		7	42,4		13	3	38,2
9	столбчатый	3	33,2		6	3	18,7
10		3	33,6		6	3	19,0
11		3	34,5		5	3	11,6
12	свайный	7	42,1		10	3	25,2

Результаты статистической группировки этих значений стоимости показали, что наименьшей стоимостью строительства характеризуются участки № 9 – 11, застраиваемые по принципу II. Эти участки располагаются узкой полосой вдоль долины ручья, характеризуются неглубоким залеганием скальных грунтов (до 10 м) и невысокой (до 0,15) льдистостью рыхлых отложений. Все остальные инженерно-геологические участки отличаются существенно большей стоимостью строительства при обоих принципах использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований, что связано либо с высокой льдистостью пород (участок № 12), либо с большой глубиной залегания кровли монолитной скалы, представленной кембрийскими известняками (участки №№ 1 – 8). Поэтому изыскания на стадии «проект» рекомендуется проводить в пределах территории участков №№ 9 – 11, а состав инженерных изысканий назначать применительно ко II-му принципу использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований. При этом глубина опробования должна быть не меньше глубины залегания монолитной скалы.

Для расчета оптимальной площади изысканий территория перспективной застройки (участки №№ 9 – 11) была разбита на 18 модулей пло-

площадью равной площади поселка (7 га), и в границах каждого модуля определены удельные стоимости освоения. Далее по правилам, изложенным выше, вычислены элементы матрицы эффективности, которые помещены в табл. 6.6. Там же в первой графе указаны площади изысканий, а в последней – соответствующие им средние удельные затраты. Перемножением этих затрат на площадь поселка получена функция стоимости освоения $C_{стр}(S_{из})$. Функция стоимости инженерных изысканий $C_{из}(S_{из})$ была рассчитана согласно требованиям РСН-31-83 в отношении видов и объемов инженерно-геологических работ, а расценки приняты по «Сборнику цен на изыскательские работы для капитального строительства» 1982 г.

Таблица 6.6

Зависимость удельных затрат на освоение территории от площади изысканий

Площадь изысканий, га	Удельные затраты на освоение территории в пределах участка изысканий, руб/м ²									
7	19,0	19,0	18,7	18,7	18,7	19,0	11,6	19,0	11,6	19,0
14	19,0		18,7		18,7		11,6		11,6	
28	18,7				11,6				11,6	
126	11,6									
продолжение										
Площадь изысканий, га	Удельные затраты на освоение территории в пределах участка изысканий, руб/м ²								Средние удельные затраты	
7	11,6	19,0	19,0	19,0	19,0	18,7	18,7	18,7	17,7	
14	11,6		19,0		18,7		18,7		16,4	
28	11,6				18,7				15,1	
126	11,6								11,6	

Составленная по этим данным оптимизационная задача решена графически (рис. 6.14). Оптимальная по стоимости площадь инженерных изысканий составила 60 га, что 8.5 раза превышает площадь пятна застройки.

Выводы.

1. Существующие нормативные документы предписывают принимать проектные решения на основе технико-экономического сравнения вариантов по начальной стоимости. При этом упускается такой важный аспект, как надежность проектируемого объекта. Очевидно, что объекты

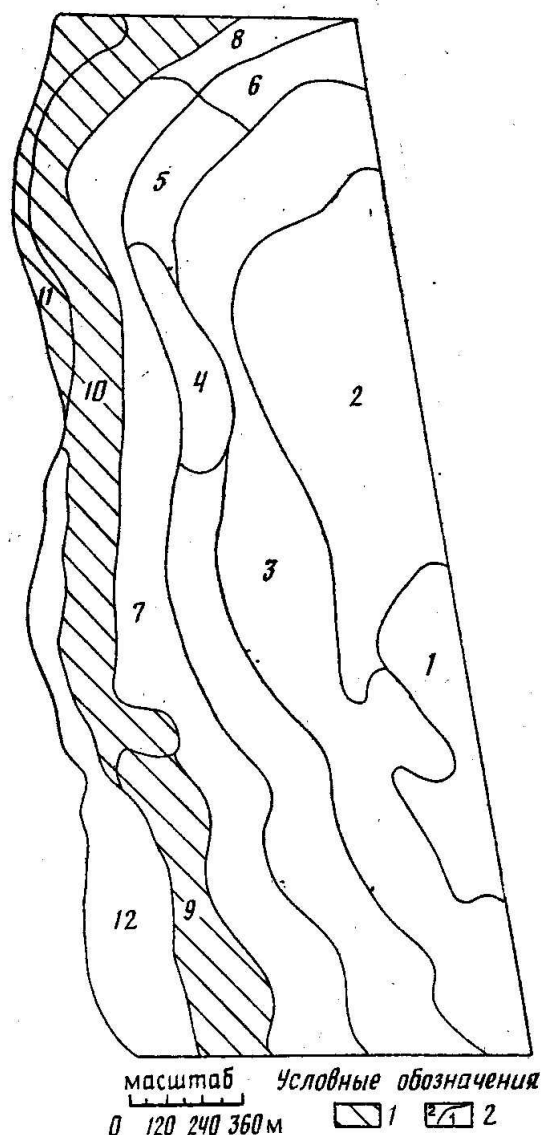


Рис. 6.13 Карта оценочного геолого-экономического районирования размещения жилого поселка.

1 – территория перспективная для застройки; 2 – граница и номер инженерно-геологического участка

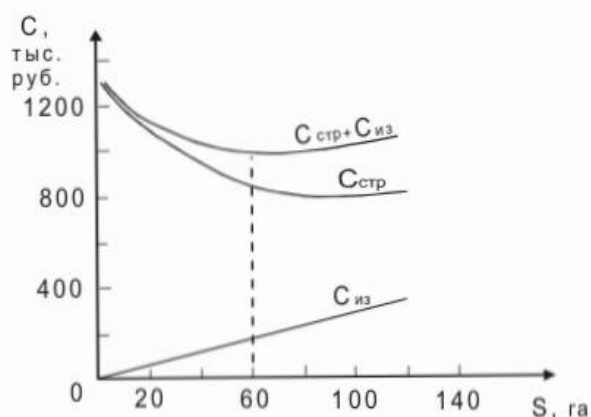


Рис. 6.14 Расчет оптимальной площади инженерных изысканий.

$C_{из}$ – стоимость изысканий;
 $C_{стр}$ – стоимость строительства

отличающиеся по надежности не могут сравниваться по начальной стоимости В сравнении обязательно должен участвовать стоимостной эквивалент надежности – цена риска, которая определяется только с позиций вероятностно-статистических расчетов. Поэтому вероятностно-статистические расчеты должны быть неотъемлемой частью проектирования, особенно в условиях глобального изменения климата – процесса случайного и плохо прогнозируемого.

2. Первым шагом в этом направлении является совмещение нормативных детерминистических методов расчета с вероятностными. «Мостом» между ними может служить коэффициент надежности K_H , который в нормативной литературе назначается директивным порядком. Такого ненормального положения можно избежать, если воспользоваться разработанной нами методикой вероятностно-экономического вычисления коэффициента и построенными по этой методике картами изолиний K_H . Практически это означает, что расчеты оснований зданий по первому предель-

ному состоянию (по несущей способности) следует осуществлять по формулам СНиП 2.02.04-85, где коэффициент надежности принимать по картам изолиний K_H . К сожалению, карты построены только для жилых зданий на многолетнемерзлых грунтах с открытыми вентилируемыми подпольями и на свайных фундаментах. Построение подобных карт для других сооружений – дело будущего.

3. Кроме этого проектирование сооружений на многолетнемерзлых грунтах в условиях климатических изменений можно осуществлять непосредственно с помощью компьютерных программ типа NAST и RW. В основу этих компьютерных программ положен метод Монте-Карло, который заменяет стохастическую задачу многократным решением (десятки и сотни раз) детерминистической задачи. По результатам решения рекомендуется составить стоимостную инженерно-геокриологическую карту. Такая карта представляет собой обычную инженерно-геокриологическую карту, на которой дополнительно отражается информация о стоимости освоения территории, об оптимальной надежности оснований, а также информация о некоторых конструктивных параметрах сооружения, например, для зданий – о глубине расположения подошвы фундамента и глубине предварительного промораживания – оттаивания грунтов, для подземных трубопроводов – о глубине заложения трубы и толщине кольцевой изоляции вокруг нее и т.п.

4. Стоимостные инженерно-геокриологические карты позволяют на научной основе осуществлять выбор принципа использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований, способа фундаментостроения и типа фундамента, планировочного решения застройки, трассы и способа прокладки трубопровода, конструкцию автомобильных и железных дорог, а также взлетнопосадочных полос аэродромов. Они дают возможность планировать изыскания в криолитозоне по результатам предварительных исследований. Нет сомнений, что их использование в проектировании является эффективным средством ускорения технического прогресса в строительстве на многолетнемерзлых грунтах

Глава 7

Методы борьбы с негативными последствиями климатических изменений

Как известно, строительные качества многолетнемерзлых грунтов (ММГ) существенно зависят от температуры. С ее повышением прочность грунтов снижается, а их способность к деформированию возрастает. Особенно опасно оттаивание мерзлых грунтов, вызывающее потерю общей устойчивости сооружений. Кроме того, тонкодисперсные грунты при оттаивании могут увеличивать свою фильтрационную способность в тысячи раз по сравнению с аналогичными ранее не замерзавшими грунтами, что весьма опасно для гидротехнических сооружений. С другой стороны понижение температуры может привести к морозобойному растрескиванию мерзлых грунтов и многолетнему промерзанию талых, что приведет в первом случае к разрыву фундаментных ростверков, а во втором к выпучиванию фундаментов. Таким образом, если меняется температура грунтов, она, как правило, сопровождается негативными явлениями. Поэтому за температурой грунтов в криолитозоне должны вестись постоянные наблюдения и осуществляться сопоставление их результатов со значениями температуры, принятыми в проекте. Однако одних наблюдений будет недостаточно, поскольку в этом случае мы будем фиксировать негативные явления только тогда, когда они уже наступили и исправлять что-либо станет уже или невозможным или слишком дорогим. Поэтому на основе наблюдений необходимо составить прогноз температуры и на основе прогноза заблаговременно принять управляющие решения по исправлению негативной ситуации. При этом необходимо знать, какие управляющие решения следует принимать, и какие управляющие средства использовать. Все это вместе взятое называется температурным мониторингом геотехнических систем, который включает три неразрывных части: наблюдения – прогноз – управление. В условиях меняющегося климата температурный мониторинг геотехнических систем приобретает особо важную роль и только на его основе можно будет избежать негативных последствий изменения климата на состояние геотехнических систем. Итак, в настоящей главе речь пойдет о температурном мониторинге. Рассмотрим подробнее его составные части.

7.1. Наблюдения за температурой грунтов в основании инженерных сооружений

Методика наблюдений предусматривает следующие этапы:

а) выбор количества скважин (шурфов) и их размещение в плане, определение максимальной глубины их заложения, диаметра, способа обсад-ки и заполнения (все перечисленное влияет на точность получаемых дан-ных ТМ);

б) подбор нужных для данного ТМ термометрических датчиков (в за-висимости от получения необходимой точности), их количество, интерва-лы установки по глубине;

в) обеспечение бесперебойной работы температурных датчиков;

г) измерения температуры и визуальные наблюдения за состоянием объ-екта мониторинга.

Что касается а) и б) то, эти работы выполняются проектной организаци-ей. Остальные пункты дальше обслуживаются другими службами. В круп-ных промышленно-территориальных комплексах в районах криолитозоны существуют мерзлотные службы. Как правило, именно мерзлотная служ-ба осуществляет температурные наблюдения в основании сооружений, а при ее отсутствии общая служба эксплуатации.

Обычно размещение термометрических скважин производится в пре-делах контура проектируемого сооружения с учетом его размеров и типом фундамента, предусмотренного техническим проектом. Например, для здания, построенного по способу стабилизации многолетнемерзлых грун-тов, схема расположения скважин в плане может выглядеть, как пред-ставлено на рисунке 7.1 (Хрусталеv, Никифоров, 1990).

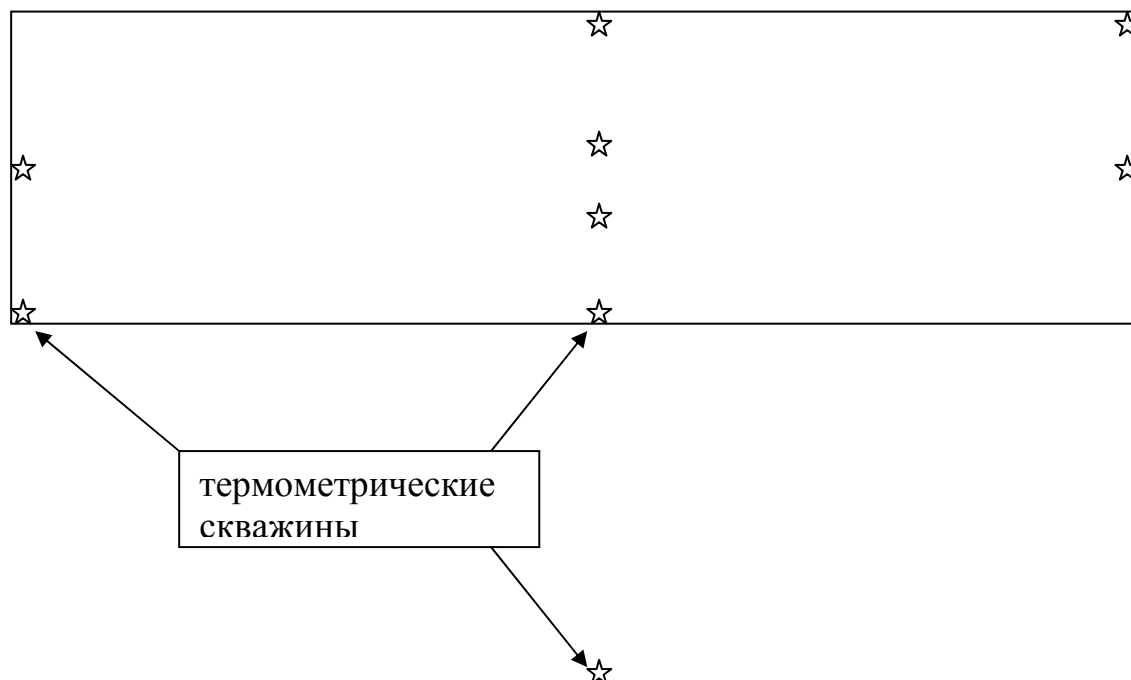


Рис. 7.1 *Схема расположения термометрических скважин в плане здания*

Количество скважин определяется в зависимости от сложности инженерно-геологических и геокриологических условий. Скважины выстаиваются после проходки в зависимости от глубины и способа проходки от 5 до 30 дней, пока точность измерения температуры не будет превышать $\pm 0,1$ °С. Обычно рекомендуют следующие интервалы установки датчиков в скважине:

в интервале глубин от 0 до 5 м – через каждые 0,5 м;

в интервале глубин от 6 до 20 м – через 1 м;

на глубинах свыше 20 м – через 5 м.

В случае неоднородности литологического состава пород или криогенной текстуры по разрезу интервалы могут изменяться.

Время от установки датчиков до измерения выдерживают не менее 3 часов, что связано с тепловой инерцией датчиков. В зависимости от типа датчиков в процессе измерения производится фиксация либо непосредственно температуры, либо омического сопротивления, либо электродвижущей силы (Указания..., 1970).

Обычно применяют следующие датчики:

– инерционные (заленивленные) ртутные термометры с ценой деления шкалы от $0,1$ °С;

– термометры сопротивления (медные или платиновые);

– полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы);

– обыкновенные или дифференциальные термопары.

Точность всех датчиков должна быть не менее $\pm 0,1$ °С.

Ртутные термометры обычно объединяют в связки (не более 5 шт). Увеличение их инерционности достигается теплоизоляцией ртутного баллона пористой пластмассой, стекловатой или пробкой. Для обеспечения гидроизоляции пористого теплоизолятора термометр запаивается в стеклянную трубку и помещается в защитный корпус из пластмассы или металла с прорезью для шкалы термометра. Для отсчета температуры они обычно извлекаются из скважин (шурфов), что не совсем удобно и может повлиять на точность измерений и на температурное поле. Измерения возможно выполнять с точностью до $\pm 0,1$ °С.

Все остальные типы датчиков используются при дистанционном измерении температур. Это несомненно удобнее и точнее. При этом не нарушается температурное поле, так как скважины засыпаются, а термометры вмораживаются. Иначе нельзя будет ручаться, что их точность не превысит $\pm 0,1$ °С. Преимущество этих типов датчиков в том, что они могут объединяться в комплекты (косы) в любом количестве. Все датчики обычно градуируются с помощью эвтектических смесей (Попов, 1954). При использовании термометров сопротивления необходимо строго соблюдать электроизоляцию датчиков, так как всякое увеличение инерционности за счет гидро- и электроизоляции значительно уменьшает их пре-

имущества перед ртутными инерционными термометрами (Кудрявцев, 1979). Кроме того, исследования И.М. Кутасова и др. (1964) показали, что погрешность измерений электрическими датчиками может достигать $0,3^{\circ}\text{C}$ при глубине погружения меньше 1 м и от $0,08^{\circ}\text{C}$ до $0,1^{\circ}\text{C}$ – больше 1 м (за счет ошибок при градуировке, а также вызванная нагреванием измерительным током подводных проводов, и за счет продольного смещения кос и т.д.).

Но, имея данные температурных замеров в скважине еще не совсем ясно, получили ли мы истинную температуру пород или узнали о распределение температурного режима в скважине. Теория формирования температуры в скважинах (Сумгин, 1937; Остроумов, 1952 и др.) и полевые эксперименты (Сумгин, 1937; Кутасов, 1964; Павлов, 1975; Девяткин и др., 1988) показали, что существуют искажения при измерении температур пород в скважинах, которые могут существенно превышать допустимую точность. Точность измерения температуры в скважинах как показали натурные наблюдения (Павлов, 1975; Девяткин и др. 1988) зависит не только от типа датчика, но и от конструкции скважины (диаметра, способа проходки, обсадки и заполнения). Основной причиной возникновения своего особого температурного режима в скважинах является конвекция воздуха. Поэтому наибольшая погрешность была зафиксирована в зимний период, за счет неустойчивого термического состояния воздуха (таблица 7.1, Девяткин и др., 1988).

Таблица 7.1

Погрешность определения температуры грунтов инерционными ртутными термометрами в воздушно-сухой скважине диаметром 50 мм, установленная на экспериментальной площадке в Якутске

Глубина расположения термометра, м	Разница между показанием термометра и температурой грунта		
	Зимой	Летом	Средняя за год
1	$-5,3^{\circ}\text{C}$	$0,9^{\circ}\text{C}$	$-1,2^{\circ}\text{C}$
2	$-2,6^{\circ}\text{C}$	$0,3^{\circ}\text{C}$	$-1,0^{\circ}\text{C}$
3	$-1,2^{\circ}\text{C}$	$-0,8^{\circ}\text{C}$	$-0,7^{\circ}\text{C}$
10	$-0,2^{\circ}\text{C}$	$0,0^{\circ}\text{C}$	$-0,1^{\circ}\text{C}$

Этими же авторами было показано, что погрешность измерения зависит и от материала заполнителя скважины. Она убывает в ряду керосин ($-3,0^{\circ}\text{C}$) – трансформаторное масло ($-1,0^{\circ}\text{C}$) – воздушно-сухая ($-0,2^{\circ}\text{C}$). Кроме того, отклонение в измерении температуры возрастает при отсутствии теплоизоляционного короба на устье скважины, при наличии жидкого заполнителя и обсадной трубы из железа (до глубины 4 м полиэтилен лучше), при удалении или уплотнении снежного покрова вокруг скважины, увеличении ее диаметра. Анализируя данные таблицы 7.1, можно говорить

об увеличении точности измерения с возрастанием глубины погружения температурного датчика в скважину и при проведении замеров в летний период. Подводя итоги, можно сделать вывод:

а) в засыпной скважине точность измерения температуры, как правило, есть точность показания термометрического датчика, т.е. $0,1^{\circ}\text{C}$;

в) в воздушно-сухой скважине точность измерения температуры зависит от времени года и глубины погружения датчика и на глубинах более 1 м может изменяться от $0,1$ до $1,0^{\circ}\text{C}$.

В настоящее время усилия исследователей направлены на создание единой информационной системы на базе компьютерных технологий. В этом отношении особого внимания заслуживает система сбора, регистрации и запоминания информации на базе логгера модели LPC, разработанная сотрудниками ВСЕГИНГЕО и РНИИ КП для целей геокриологического мониторинга в районах Крайнего Севера (*Дубровин и др., 1996*). Функционально логгер состоит из микроконтроллера на базе микропроцессора INTEL 80C85 с таймером реального времени и функцией ALARM (будильник), универсального аналого-цифрового преобразователя двойного интегрирования и встроенного локального коммутатора. Задача для работы логгера формируется средствами пользовательского программного обеспечения в реальном времени.

Логгер LPC позволяет производить измерения первичных датчиков с выходным сигналом в виде изменения электрического сопротивления, ЭДС, частоты или периода, а также принимать цифровые потоки от цифровых датчиков произвольной разрядности. Все датчики подключаются к универсальной аналого-цифровой магистрали, максимальная протяженность которой достигает 2-х км, при этом возможное количество подключаемых датчиков 1024 шт.

Блок режимных геокриологических наблюдений включает замеры температуры горных пород в скважинах любой глубины через 0,5-1,0 м, четырех измерений в сутки температуры поверхности почвы, а также результаты снегомерных съемок и глубины сезонного оттаивания – промерзания пород. Все измерения привязаны к конкретной календарной дате.

Логгер работает в автономном режиме на двух специальных батарейках, которые гарантируют двухлетний срок функционирования измерительной системы с запоминанием информации без замены источника питания. Передача информации с логгера на персональный компьютер пользователя может осуществляться через любой интервал времени путем непосредственного подключения компьютера к логгеру или с помощью радиотелефонной и спутниковой связи.

Обработка данных измерения температуры грунта в настоящее время в основном сводится к построению графиков вертикального распределения температур в скважине по глубине на период измерения, реже – графиков, показывающих изменение температуры во времени на определенных фик-

сированных глубинах и совсем редко к построению температурного поля. Построение температурного поля выполняется путем интерполяции данных наблюдений между температурными скважинами известными полиномами. При этом допускаются две неточности: во-первых, полиномы не отражают физическую сущность формирования температурного поля; во-вторых, скважины не охватывают всего пространства основания.

Как известно, под основанием понимается массив грунта А (рис. 7.2), на который распространяется тепловое и механическое влияние сооружения. Размеры этого массива, как правило, слишком велики, чтобы он мог быть полностью охвачен наблюдательными скважинами. Обычно скважины характеризуют только часть этого массива, а именно массив В, вложенный в массив А.

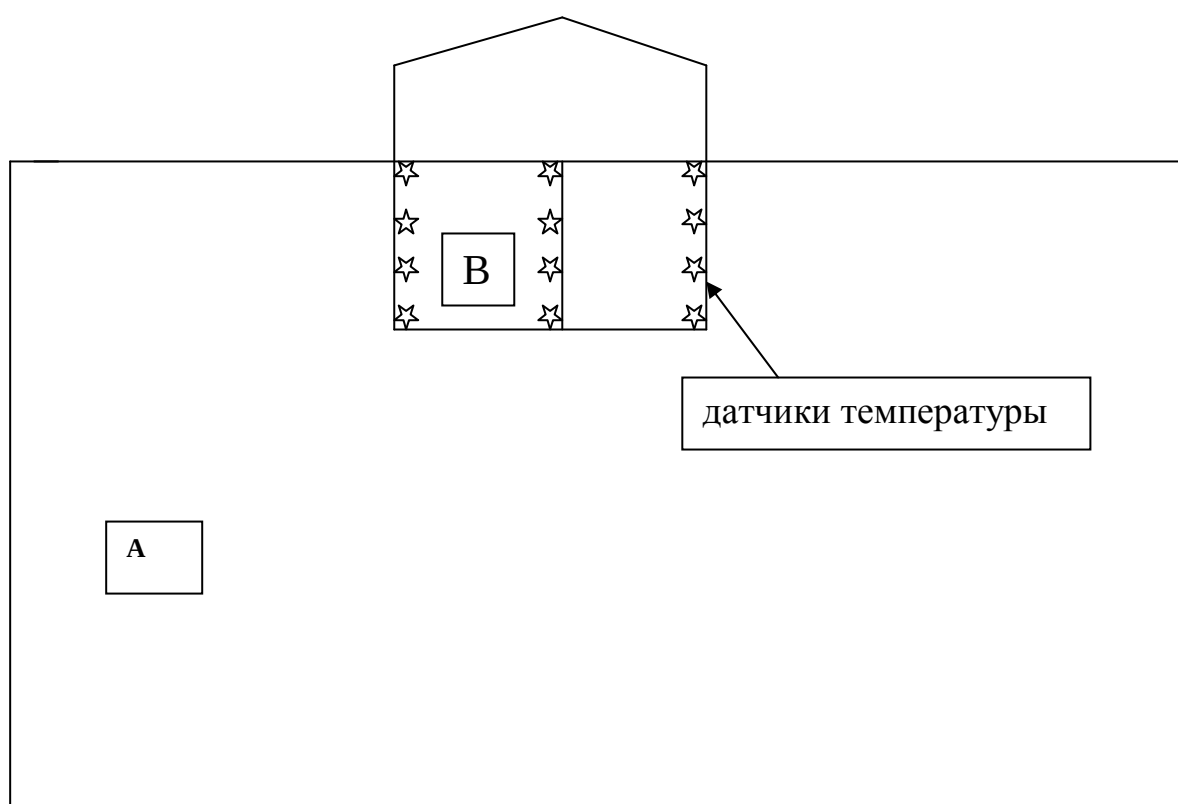


Рис. 7.2 Основание здания «А» и область наблюдений «В»

Имея данные замеров в скважинах в области В, с помощью полиномов, делали интерполяцию полученных значений температур только в области В, не задавая вопросов, а что же происходит в целом в области А. Чтобы ответить на этот вопрос, требуется экстраполяция данных массива В на весь массив А. Однако в нашем случае область экстраполяции значительно превышает область интерполяции. В то же время известно (Яковлев, 1953), что приемом математической экстраполяции следует пользоваться с очень большой осторожностью, поскольку мы не можем знать поведение функции за пределами исследованного интервала. Для плавных

функций (и только для них) допускается проводить экстраполяцию не выходя за пределы шага интерполяции. В нашем случае это будет расстояние между датчиками температуры. Что касается математической интерполяции, то она также будет существенно затруднена в силу того, что для функций многих независимых переменных (в нашем случае - координат) нельзя решать поставленную задачу при произвольном количестве узлов интерполяции и их произвольном расположении (*Березин и др., 1966*).

Таким образом, для решения этих задач необходимо будет разработать интерполяционные функции, основанные на физических представлениях о протекающем тепловом процессе в основании сооружения.

Математическое моделирование этого процесса по компьютерной программе "WARM" (*Программа WARM, 1994*) показало хорошее согласование результатов моделирования с данными наблюдений. Это позволяет нам принять за основу фактического температурного поля его математическую модель, которая в точках наблюдений получит некоторые поправки. Наша задача будет заключаться в том, чтобы эти поправки распределить и, сложив их с результатами моделирования, получить фактическое температурное поле, т.е. разбросать поправки по всей расчетной области. При этом очевидно принять, что на границах расчетной области поправки равны нулю. Таким образом, задачи интерполяции в массиве В и экстраполяции за его пределами оказывается сведенной к задаче интерполяции температурной поправки во всем массиве А. Ее решение возможно при наличии интерполяционной функции. Дадим описание этой функции. Для этого условно допустим, что искажение температурного поля в массиве В (появление поправки) вызвано наличием фиктивных источников (стоков) тепла в точках замеров, появившихся внезапно и работающих от предыдущего замера до настоящего.

Температурное поле фиктивного источника (стока) в бесконечном пространстве зависит от расстояния до него и от продолжительности воздействия этого источника (стока). В нашем случае реальное температурное поле не бесконечно, и при приближении к участкам границы с заданной температурой коррекции должны уменьшаться до нуля.

Для количественного описания данного этапа мониторинга введем следующие обозначения. Допустим, что мы вычисляем коррекцию в некоторой внутренней точке расчетной области, которую обозначим через W . Точки, в которых делались замеры температуры, обозначим через Z_j , где j – номер точки с замером, причем $j = 1, 2, \dots, N_z$, а N_z количество таких точек. Через G_i обозначим участки границы расчетной области с фиксированной температурой, где коррекции должны быть нулевыми. Номер такого участка i принимает значения $1, 2, \dots, N_G$, где N_G – количество участков границы с фиксированной температурой. Пусть необходимая величина коррекции температуры в точке с замером Z_j оказалась равной

d_j . Эта величина получилась как разность измеренной температуры в скважине и температуры в этой точке, полученной из решения уравнения теплопроводности. Обозначим через r_j расстояние от внутренней точки W до точки Z_j . Тогда прирост температуры D_j в точке W за счет действия фиктивного точечного источника (стока) тепла в точке Z_j согласно известному решению теории теплопроводности (Лыков, 1952), можно вычислить по формуле:

$$D_j = \frac{q_j}{4\pi \cdot \lambda_s \cdot r_j} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r_j}{2 \cdot \sqrt{a_s \cdot \tau}}\right), \quad (7.1)$$

где q_j – мощность источника (стока) тепла, λ_s, a_s – средние значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности среды, соответственно, в блоках Z_j и W , а τ есть время воздействия фиктивного источника (стока). Введенная здесь специальная функция erfc определяется следующим образом:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_x^\infty \exp(-u^2) \cdot du. \quad (7.2)$$

Приведенную здесь формулу для D_j непосредственно в данной проблеме использовать нельзя, но она дает нам закон убывания коррекции температуры с ростом расстояния r_j до блока, в котором сделан замер. Алгоритм вычисления коррекции температуры в произвольном блоке W должен удовлетворять следующим условиям. Воздействия воображаемых источников (стоков) тепла – блоков, где произведены замеры, должны суммироваться. При приближении к любому такому блоку величина коррекции температуры стремиться к величине коррекции в этом блоке. При приближении к любому участку границы расчетной области с заданной температурой величина коррекции должна стремиться к нулю. Исходя из сформулированных условий и закона убывания коррекции температуры с ростом расстояния мы составили следующую формулу для вычисления величины коррекции температуры D_w в произвольном внутреннем блоке W расчетной области:

$$D_w = \frac{\sum_{j=1}^{N_z} \frac{d_j}{r_j} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r_j}{2 \cdot \sqrt{a_j \cdot \tau}}\right)}{\sum_{j=1}^{N_z} \frac{1}{r_j} + \sum_{i=1}^{N_G} \frac{1}{r_i^*}}, \quad (7.3)$$

где a_j можно взять как среднюю величину температуропроводности в блоках W и Z_o , а τ интервал времени между замерами. Через r_i^* мы обозначили расстояние от внутреннего блока W до участка G_i границы расчетной области. Заметим, что при вычислении расстояния между любыми блоками расчетной области отсчет расстояний делается всегда от центров

блоков. При вычислении расстояния до участка границы отсчет расстояния делается до середины этого участка. Легко проверить соблюдение в формуле для D_w необходимых условий. Пусть, например, текущая точка внутреннего блока W приближается к некоторому блоку с замером $Z(j = j^*)$. При достаточно малом $r(j = j^*)$ всеми слагаемыми сумм в числителе и знаменателе формулы можно пренебречь кроме члена при $j = j^*$.

При r_j , стремящемся к нулю, величина $\operatorname{erfc}(\frac{r_j}{2 \cdot \sqrt{a_j \cdot \tau}})$ стремится к единице.

Следовательно, в этом случае окажется, что $D_w = d(j = j^*)$, что и требовалось по условию. Пусть теперь текущая точка внутреннего блока W приближается к участку $G(i = i^*)$ границы расчетной области. При достаточно малом $r(i = i^*)$ всеми слагаемыми в знаменателе можно пренебречь, кроме слагаемого $\frac{1}{r^*(i = i^*)}$. Если при этом $r^*(i = i^*)$ стремится к нулю, то очевидно, D_w окажется равной нулю.

Таким образом, сложение модельного температурного поля с поправкой дает фактическое температурное поле, каковое и следует сравнивать с проектным. В результате решения этой задачи определяется поле разности температур «факт минус проект» и тем самым выявляются опасные зоны, причем не только в непосредственной близости от термометрических скважин, но и по всему массиву основания. В результате даже при редком расположении термометрических скважин появляется возможность оперативного выявления зон опасных отклонений температуры. Однако, как отмечалось выше, в этом случае принятие управляющих решений происходит с опозданием, что влечет большие материальные потери. Для принятия своевременных решений нужен прогноз фактических температурных полей, к изложению которого мы переходим.

7.2. Прогноз температурного режима оснований инженерных сооружений на основе данных наблюдений за температурой грунта

Наши исследования показали, что на основании уже известных за несколько лет фактических температурных полей можно достаточно точно прогнозировать динамику теплового режима грунтов и выявлять опасные зоны заблаговременно. Прогноз температурного поля возможен, когда имеется не менее трех замеров температуры и соответствующих им фактических температурных полей. Крайне желательно, чтобы моменты замеров были разделены интервалом времени равным или кратным одному году, так как в противном случае сезонные колебания температуры будут «смазывать» основную тенденцию в динамике температурного поля и снижать точность прогноза.

После расчета каждое прогнозное температурное поле сравнивается с проектом (точно также, как это имело место для фактического температурного поля), определяется поле разности температур «прогноз минус проект» и тем самым выявляются опасные зоны, которые могут появиться в будущем.

Прогнозные расчеты температурных полей по фактическим температурам грунтов составляют задачу экстраполяции во времени фактической температуры, заданной на дискретном множестве моментов замера, и ее следует рассмотреть подробнее.

В предыдущем разделе мы указывали, что экстраполяция известными полиномами в нашей задаче мало перспективна и экстраполяционные функции должны подбираться на основе физических представлений, т.е. в основу должны быть положены дифференциальные уравнения, описывающие перенос тепла с учетом промерзания и оттаивания грунтов. При этом возникает так называемая обратная задача теплопроводности: по заданным в определенные моменты температурам восстановить начальные и граничные условия. Хорошо известно, что эта задача в математическом отношении некорректна и не имеет однозначного решения.

Выходом из этой ситуации представляется компромиссный подход, при котором физическая суть задачи служит основанием для отыскания класса опорных функций, позволяющих найти наилучшую экстраполяционную функцию путем сравнительно простых вычислений. Для его реализации используем приближенный метод расчета температурных полей в основаниях сооружений, разработанный Л.Н. Хрусталевым (1971) и названный им методом эквивалентных температур. Идея его состоит в сведении трехмерной задачи теплопроводности к совокупности одномерных задач (по числу расчетных точек).

Предположим, что нас интересует изменение температуры в некоторой точке основания на глубине H . Рассмотрим распространение тепла в одномерном случае, т.е. вообразим вертикальный полубесконечный стержень с такими же теплофизическими характеристиками, как и у грунтового массива (в той же точке на глубине H) и при тех же начальных условиях. Варьируя температуру на верхней границе стержня, всегда можно добиться того, что в интересующей нас точке температура стержня в заданный момент времени будет совпадать с фактической температурой грунта (в той же точке и в тот же момент). Найденную из этого условия температуру назовем эквивалентной температурой. Каждой точке и каждому моменту времени будет соответствовать, вообще говоря, своя эквивалентная температура.

Автором метода показано, что зависимостью эквивалентной температуры от времени можно пренебречь. При этом законы изменения температуры для точки стержня (одномерная задача) и точки грунтового массива (трехмерная) несильно различаются. Решение же одномерной задачи мо-

жет быть получено в аналитической форме, т.е. в виде функций, зависящих от времени и некоторых параметров (один из них – эквивалентная температура). Эти функции и следует принять в качестве опорного класса для экстраполяции. Выбор из этого класса конкретной функции экстраполяции температуры сводится к тому, что по данным замеров температуры определяется эквивалентная температура и другие неизвестные параметры.

Опуская подробности, которые можно найти в работе (Хрусталева, 1971) запишем зависимость температуры T от времени τ в виде:

$$T(\tau) = x \cdot E(\tau) + T_0, \quad (7.4)$$

$$E(\tau) = \operatorname{erfc}\left(\frac{H}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right), \quad (7.5)$$

где x – неизвестный параметр, связанный с эквивалентной температурой; a – коэффициент температуропроводности мерзлой породы в данной расчетной точке на глубине H .

Вторым параметром в выражении (7.4) является начальная температура T_0 , которую можно отождествить со средней годовой температурой ММГ в естественных условиях. Часто эта температура неизвестна, поэтому в общем случае ее следует рассматривать как второй неизвестный параметр в выражении (7.4), в дальнейшем обозначаемый через y .

Для определения неизвестных параметров мы располагаем значениями температуры грунтов T_i , измеренными в определенные моменты времени τ_i . Подставляя их в (7.4), получаем систему уравнений:

$$x \cdot E_i + y = T_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (7.6)$$

где N – количество замеров температуры в данной точке; E_i – значение функции (7.5) в момент времени τ_i .

Измеренные значения температуры искажены погрешностями измерений, техногенными и естественными случайными отклонениями. Поэтому при $N > 2$ система уравнений (7.6) оказывается несовместной и представляет собой систему условных уравнений, решаемую методом наименьших квадратов.

Когда значения неизвестных параметров x и y найдены, прогноз температуры на любой момент времени осуществляется по формуле:

$$T = x \cdot E(\tau) + y. \quad (7.7)$$

Для демонстрации реальной точности прогноза нами выполнено математическое моделирование ввиду отсутствия надежных натурных данных с достаточной длительностью периода наблюдений. Моделировалось тепловое взаимодействие мерзлой плотины водохранилища с грунтами основания. В табл. 7.2 представлены результаты моделирования для наименее благоприятной области, расположенной на 10 м вертикально вниз от уреза воды, где условия теплообмена весьма далеки от одномерного при-

ближения, положенного в основу рассмотренной методики. Тем не менее точность прогноза вполне удовлетворительная (0.1- 0.2 °С, что соответствует точности измерения температуры в скважинах). Когда длительность периода прогнозирования порядка одной трети от длительности периода наблюдений.

Таблица 7.2

Результаты оценки точности прогноза температуры

Длительность наблюдений, лет	Точность прогноза в °С при его длительности в годах				
	1	2	3	4	5
3	0,15	0,24	0,30	0,37	0,42
4	0,12	0,17	0,23	0,27	0,30
5	0,10	0,15	0,18	0,20	0,21
6	0,08	0,13	0,15	0,17	0,20

7.3. Компьютерная диагностика состояния оснований инженерных сооружений

В предыдущих разделах описана методика обработки данных температурных наблюдений. Поскольку объем обрабатываемой информации достаточно велик, а вычислительные алгоритмы весьма трудоемки, нами разработана компьютерная программа, позволяющая автоматизировать этот процесс (*Программа ТЕМ*, 1995) и выявлять опасные для устойчивости сооружений зоны грунта в его основании, т.е. производить диагностику оснований.

Работа пользователя с программой ТЕМ происходит в режиме диалога через систему вложенных меню. Главное меню, называемое таблицей состояния задачи, отражает текущее состояние работы над объектом и указывает, какие данные и результаты уже получены и какие должны быть получены в данный момент.

При затруднениях можно вывести на экран дисплея помощь – текст, поясняющий работу в данном режиме. Помощь является контекстно зависимой, т.е. выводится пояснение именно к тем действиям, которые пользователь выполняет в данный момент.

Работа с программой состоит из трех этапов: а) подготовительный этап, б) этап работы в годы наблюдений, в) этап получения результата (выходных данных).

На подготовительном этапе вычисляются проектные температурные поля на каждый год эксплуатации сооружения или комплекса сооружений на основе так называемых базовых данных, которые подаются на вход программы. Базовые данные содержат: конфигурацию расчетной области и состав грунтов основания, конечно-разностную сетку, проектные гранич-

ные условия, теплофизические характеристики грунтов и их начальное температурное поле. При этом начальное температурное поле и граничные условия составляются по данным инженерно-геокриологических изысканий и метеорологических наблюдений в районе строительства

Работа в годы наблюдений ведется на основе данных наблюдений (текущие данные).

Текущие данные вводятся после выполнения очередного замера температуры в скважинах (чаще всего это делается раз в год). Прежде всего, вводится дата замера, и в таблице состояния задачи появляется новая строка с этой датой. Следующим шагом должен быть ввод текущих (реальных) граничных условий за период от предшествующего замера до текущего, дата которого только что была введена. Затем вводятся результаты замеров в скважинах.

Текущие (реальные) граничные условия содержат полученную по результатам соответствующих наблюдений (измерений) информацию о реальном тепловом режиме сооружений и реальных метеорологических условиях за указанный период. Эти условия задаются, как правило, только на верхней границе разреза – под сооружениями и на дневной поверхности. Однако если на разрезе есть подземные сооружения, например трубопроводы, то граничные условия задаются и на контакте этих сооружений с грунтом. Если какие-то реальные данные отсутствуют (например, не измерялась высота и плотность снежных отложений), то вместо них используются соответствующие данные из проектных граничных условий.

Текущие граничные условия могут быть первого, второго или третьего рода. Кроме того, на разных участках границы могут быть условия одного рода, но с разными значениями параметров (например, условия III рода под зданием и вне его – разные температуры и термические сопротивления). Для отражения этой ситуации вводится понятие разных групп граничных условий одного и того же рода. Род и группа для всех граничных условий заданы в составе базовых данных и не могут быть изменены при вводе текущих. На изображении разреза условия I, II и III рода выделены разным цветом. Количество групп условий каждого рода и номер группы для того условия, на которое указывает курсор, отмечается соответствующим текстом на экране. Любой из параметров граничных условий – температура, термическое сопротивление, тепловой поток – может быть задан двумя способами: либо постоянным значением, либо набором среднемесячных значений. Первый способ используется для задания температуры в зданиях и сооружениях с постоянным тепловым режимом, а также постоянных термических сопротивлений полов, теплоизоляции и т.п. Второй – для описания сезонно или нерегулярно изменяющихся условий: температуры наружного воздуха, снежного покрова, температур внутри сооружений с переменным тепловым режимом.

Предусмотрено, что результаты замеров температур в скважинах вводятся после ввода даты и текущих граничных условий (иначе таблица состояния задачи не позволит начать ввод замеров). Эта группа данных включает в себя координаты температурных датчиков и измеренные значения температуры. Горизонтальная координата отсчитывается от левого края расчетной области, вертикальная – глубина – от верхнего края. Если верхняя поверхность не горизонтальна (при наличии насыпи или выемки), то глубина для всех датчиков отсчитывается от самой верхней точки разреза. После ввода координат положение датчика отмечается на изображении разреза специальным знаком. Ошибочные координаты можно тут же исправить. То же самое относится и к значениям температур.

По завершении ввода текущих граничных условий и результатов замеров, они записываются в рабочие файлы.

Расчетные процедуры запускаются после того, как введены все необходимые исходные данные. Информация о том, что расчет выполнен, заносится в таблицу состояния задачи; туда же помещается информация о вводе очередной группы исходных данных.

Предусмотрено сохранение всех исходных данных и результатов расчетов в файлах на магнитном диске. Хранение данных организовано в виде "летописи жизни" объекта с возможностью мгновенного доступа к любой информации за предшествующие годы, что делается через ту же таблицу состояния задачи. Состояния температурного поля на заданные моменты времени могут выводиться на экран или на принтер в графическом и цифровом видах.

Таким образом, программа обеспечивает максимальный автоматизм ввода и обработки данных наблюдений за температурой грунта.

Этап получения результата заключается в выдаваемых по команде результатах расчета, отображающих входную информацию и результаты расчетов (температурные поля и поля разности температур, по которым выявляются опасные зоны). Для удобства пользователя разработана программа графической визуализации полей разности температур («факт – проект», «факт – финал», «прогноз – проект», «прогноз – финал»), что делает наглядным процессы сопоставления фактических температур с проектными и обнаружения опасных изменений температур в основании сооружений. Градации температур отображаются различным цветом на экране дисплея. Так, например, при строительстве по принципу I области поля разности температур «прогноз – финал» с положительным значением разности можно закрасить в красный цвет, который будет сигнализировать о появлении опасных зон в основании сооружения и его аварии через время, соответствующее периоду прогноза.

При цифровом выводе результатов числовые значения температуры или разности температур, отображаются одновременно с координатами

точек основания, к которым они относятся. По желанию можно вывести на экран и теплофизические характеристики грунтов в точке замера.

Для удобства пользователя предусмотрена возможность вывод не всего поля, а только его фрагмента, выделенного прямоугольной рамкой. Размеры рамки и ее положение на разрезе можно изменять. В этом режиме при выводе графики изображение внутри рамки увеличивается до стандартных размеров полного изображения разреза; при выводе чисел отображается содержимое только тех расчетных точек, которые попали в рамку.

Основными достоинствами программы ТЕМ являются:

- а) дружелюбность программы по отношению к ее пользователю, простота работы с программой при большом разнообразии обрабатываемых данных;
- б) высокая наглядность представления результатов расчетов;
- в) простота доступа ко всем исходным, промежуточным и результирующим данным.

7.4. Управление надежностью геотехнической системы

В этом разделе мы попытаемся ответить на вопрос: что делать с геотехническими системами, которые уже построены и по данным диагностики будут испытывать деформации в ближайшем будущем? Наши усилия направим на случай потепления климата – процесса наиболее распространенного в настоящее время.

Однозначного ответа на поставленный вопрос пока нет. Надо думать, что рассмотренный нами выше способ увеличения опорной части фундаментов (увеличение коэффициента надежности), в данном случае мало пригоден, ибо подведение дополнительных фундаментов под уже построенные сооружения неблагоприятная задача, очень трудоемкая и дорогая. Здесь должны быть другие решения, направленные на то, чтобы сохранить (или восстановить) существовавший до потепления температурный режим грунтов в основании сооружения. Такие решения есть.

Они основываются на использовании естественного или искусственного «холода». Очевидно, что использование естественного «холода» предпочтительнее. Возможность такого решения определяется большой разницей между средней годовой температурой воздуха и температурой грунтов. Установки, использующие естественный «холод» (вентилируемые наружным воздухом подполья, вентиляруемые трубы, горизонтальные и вертикальные термосифоны) работают только в зимний период, закачивая в основание сооружения «холод», который в летний период частично утрачивается. Если бы потерь «холода» не происходило, то температура грунта была бы близка к средней зимней температуре наружного воздуха и резерв «холода» в основании сооружений был бы достаточно большим,

чтобы обеспечить надежность оснований сооружений в условиях глобального потепления в течение многих лет. Решить эту проблему можно с помощью теплоизоляторов. Однако следует понимать, что все решения, основанные на использовании естественного «холода», ограничены сроками, хотя и очень большими (многими десятками лет), и не могут служить вечно.

Другое дело использование искусственного «холода», которое сроками потепления не ограничено. Здесь главная задача заключается в том, чтобы найти экономные способы расходования энергии. В части оптимального использования энергии в первом ряду стоят тепловые насосы, которые отбирают низкопотенциальное тепло в основании сооружения и передают его в отопительную систему самого сооружения. При этом затраты электроэнергии на отопление внутренних помещений в три раза меньше затрат на их отопление электронагревателями. Работа тепловых насосов происходит только в отопительный период. Далее следуют термосифоны с электрическими насадками, это комбинированные устройства: зимой они работают за счет естественного «холода», летом – за счет электрической энергии. И, наконец, последними в ряду стоят аммиачно-рассольные установки, которые включаются в работу, когда температура грунта превысит некий задаваемый предел. В целях экономии энергии установки, использующие искусственный «холод», применяются также в сочетании с теплоизоляторами.

Рассмотрим последовательно два способа управления геотехнической системой, первый из которых относится к первому принципу использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований, а второй – ко второму.

Восстановление температурного режима ММГ с помощью охлаждающей подсыпки.

Охлаждающая подсыпка устраивается под зданием с вентилируемым подпольем высотой не менее 1,5 м и за пределами здания, если это требуется по климатическим условиям.

Конструкция охлаждающей подсыпки состоит из четырех элементов (рис. 7.3): песчаная насыпь, система горизонтальных парожидкостных термосифонов, укладываемая у подошвы насыпи, теплоизолятор, укладываемый у поверхности насыпи и защитный слой. Мощность песчаной насыпи и толщина теплоизолятора подбираются из условия – подошва сезонного оттаивания грунтов всегда должна находиться в теле насыпи.

Система охлаждения состоит из расположенных друг возле друга с шагом 1,0-3,0 м. труб испарителей парожидкостных «горизонтальных» самотечных или напорных термосифонов; последние называются системой

ГЕТ. Испарители укладываются на слой песчаной подготовки толщиной не менее 0,1 м. ниже сезонного оттаивания насыпи на 0,1 м.

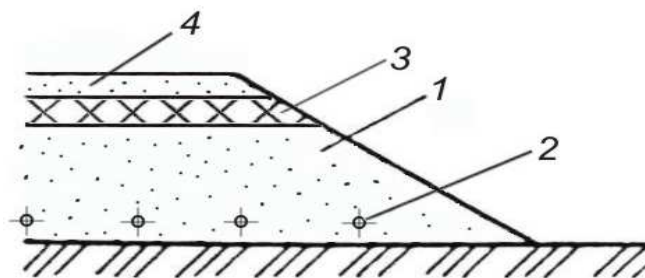


Рис. 7.3 Охлаждающая подсыпка.

1 – песчаная насыпь;
2 – парожидкостные горизонтальные термосифоны;
3 – синтетический теплоизолятор;
4 – защитный слой

Принцип работы самотечных противоточных (пар и конденсат двигаются навстречу друг другу) термосифонов заключается в следующем. В зимнее время жидкий хладагент, находящийся у дна подземной части установки, испаряется и в виде пара поднимается в верхнюю надземную часть установки, где под действием низких отрицательных температур атмосферного воздуха конденсируется и тонкой пленкой стекает по внутренней стенке замораживающей колонки ко дну ее подземной части, где вновь испаряется. Цикл испарение – конденсация продолжается непрерывно, пока температура подземной части (испарителя) будет выше температуры надземной части (конденсатора). Если температура испарителя станет ниже температуры конденсатора, то конденсации паров хладагента не происходит и цикл прерывается, термосифон запирается. Это имеет место в летнее время, а также во время зимних оттепелей.

Гидродинамическое сопротивление в раздельно движущихся потоках восходящего пара и нисходящей жидкой пленки незначительны, а силы, обуславливающие их движение (гравитация, перепад давлений) достаточно велики, поэтому для приведения в действие термосифона требуется перепад температур между грунтом и атмосферным воздухом не более 2-4⁰С. Испаритель для лучшего растекания пленки конденсата имеет внутреннюю винтовую насечку и располагается к горизонту под углом не менее 5⁰. Длина подземного теплообменника (испарителя) самотечного горизонтального термосифона не превышает 30 м., что позволяет устанавливать его под сооружениями шириной не более 60 м (с двух сторон сооружения).

Принцип работы напорных термосифонов (система ГЕТ) и их конструкция остаются «know how» его изобретателей (Долгих и др., 1991) мы же со своей стороны отметим только то, что в этой конструкции движение хладагента прямоточное (пар и конденсат двигаются в одном направлении) под действием гидравлического напора, который создается и регулируется высотой расположения конденсатора над дневной поверхностью. Прямоточное движение хладагента существенно уменьшает внутреннее гидроди-

намическое сопротивление термосифона, что в сочетании с напором позволяет довести длину подземного теплообменника (испарителя) до 800 м. Большая длина испарителя требует развитого конденсатора, который изготавливается в виде нескольких радиаторов, собранных в один блок. К конденсаторному блоку подключается от одного до пяти испарителей. Система ГЕТ позволяет охлаждать большие по ширине площади застройки.

Самотечные и напорные горизонтальные парожидкостные термосифоны сегодня широко используются в строительстве. Вместо термосифонов в охлаждающей подсыпке могут использоваться вентилируемые наружным воздухом трубы, а также охлаждающие контура холодильных машин. Однако наиболее простой способ использования установок искусственного «холода» в охлаждающей подсыпке – охлаждение с их помощью конденсаторов термосифонов.

Расчет охлаждающей подсыпки. Под охлаждающей подсыпкой формируется температура грунта отличная от температуры грунта в естественных условиях. Эта температура (среднегодовая температура грунта на подошве слоя сезонного оттаивания, условно принимаемая равной температуре грунта у подошвы слоя с годовыми теплооборотами) вычисляется по формуле, вывод которой приводится в работе (Хрусталева, Пустовойт, 1995):

$$T_n = [\Omega_w + (L_v / \lambda_f) \chi \xi] / t_y, \quad (7.8)$$

где Ω_w – сумма зимних градусочасов температуры атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{С}\cdot\text{ч}$; L_v – количество тепла, затрачиваемое на оттаивание материала подсыпки, $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$; λ_f – коэффициент теплопроводности материала подсыпки в мерзлом состоянии, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{ч})$; χ , ξ – вспомогательные параметры, определяемые, соответственно, по формуле (7.9) и (7.11); t_y – продолжительность года, 8760 ч.

$$\chi = \frac{b_p}{\pi} (B + 0,5 \cdot \ln \frac{b_p}{\pi \cdot d_p}), \quad (7.9)$$

$$B = \lambda_f R_{in} / (d_p k_h), \quad (7.10)$$

где d_p – диаметр испарителя термосифона, м; b_p – расстояние между испарителями (шаг расстановки термосифонов), м; R_{in} – внутреннее термическое сопротивление термосифона, определяется по формуле (7.12), $\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{С}/\text{Вт}$; k_h – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий снижение тепловосприятия термосифона из-за горизонтального расположения испарителя, выбирается по таблице 7.4.

$$\xi = 0,5 d_{th} \{ d_{th} + 2[\lambda_f (R_s + R_{is})] \} / \chi, \quad (7.11)$$

где d_{th} – глубина сезонного оттаивания песчаной насыпи, определяется по формуле (7.13), м; R_s – среднее зимнее термическое сопротивление снежного покрова на поверхности охлаждающей подсыпки, принимается в вен-

тилируемом подполье равной нулю, за пределами здания – среднему зимнему термическому сопротивлению снежного покрова в естественных условиях, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; R_{is} – термическое сопротивление теплоизоляции, укладываемой у поверхности подсыпки, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

$$R_{in} = \frac{S_e}{\alpha_{out} S_c}, \quad (7.12)$$

где α_{out} – коэффициент теплообмена между наружным воздухом и поверхностью конденсатора парожидкостного термосифона $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, определяемый по данным табл. 7.3; S_e , S_c – площади поверхности испарителя и конденсатора термосифона, м^2 .

Таблица 7.3

Значения α_{out} для стальных гладких (числитель) и оребренных (знаменатель) труб конденсатора термосифона, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

Радиус трубы конденсатора, мм	Скорость ветра, м/с				
	0	2	4	6	8
17,0	6,9 / 8,7	21,0 / 24,4	33,0 /	45,0 /	55,0 /
22,0	6,5 / 9,2	20,0 / 24,4	31,0 /	42,0 /	51,0 /
28,5	6,0 / 11,0	17,0 / 30,2	29,0 /	38,0 /	48,0 /
36,5	5,3 / 11,2	16,0 / 30,2	27,0 /	36,0 /	44,0 /
44,5	4,9 / 10,3	15,0 / 26,7	26,0 /	34,0 /	41,0 /
54,0	4,4 / 8,2	15,0 / 23,2	24,0 /	31,0 /	38,0 /
63,5	4,1 / 11,8	14,0 / 33,6	23,0 /	30,0 /	37,0 /
73,0	3,6 / 10,6	14,0 / 29,0	22,0 /	29,0 /	36,0 /
84,0	3,4 / 10,0	13,0 / 25,5	21,0 /	28,0 /	35,0 /

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th} \cdot \Omega_s}{L_v} \mu^2 + (\lambda_{th} \cdot R_{is})^2} - \lambda_{th} R_{is}, \quad (7.13)$$

где Ω_s – сумма летних градусочасов температуры атмосферного воздуха, $^\circ\text{C} \times \text{ч}$; λ_{th} – коэффициент теплопроводности материала подсыпки в талом состоянии, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; μ – безразмерный коэффициент, учитывающий отток тепла в подстилающие подсыпку многолетнемерзлые грунты при ее сезонном оттаивании, определяется по формуле (7.14).

$$\mu = 1 + 0,033 T_n, \quad (7.14)$$

В завершение расчета определяется мощность песчаной насыпи охлаждающей подсыпки:

$$H_d \geq d_{th} + d_p + 0,2, \quad (7.15)$$

Таблица 7.4

Значения безразмерного коэффициент k_h

Рабочее тело	k_h при термическом сопротивлении R_{in} в $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$								
	0,090	0,040	0,028	0,022	0,017	0,015	0,012	0,010	0,009
Аммиак	1,00	0,85	0,80	0,75	0,68	0,65	0,60	0,57	0,50
Хладон	0,75	0,50	0,35	0,32	0,30	0,27	0,24	0,20	0,18

При расчете T_n в вентилируемом подполье здания принимается $T'_0 = T_n$, вне здания $T_0 = T_n$.

После вычисления T'_0 и T_0 легко вычислить по методике, изложенной в главе 5, надежность основания здания с открытым вентилируемым подпольем и охлаждающей подсыпкой, а по методике, изложенной в главе 6, оптимальную надежность с учетом и без учета климатических изменений.

Подкрепим изложенное примером расчета T_n .

Пример 1. Постановка задачи. В районе г. Якутск планируется возвести охлаждающую подсыпку со следующими параметрами охлаждающей системы: $d_p = 0,038$ м, $b_p = 3,0$ м, хладагент – аммиак, конденсатор термосифонов выполнен из оребренных труб с наружным радиусом 17 мм, отношение площади поверхности конденсатора к площади поверхности испарителя равно $S_c / S_e = 1,5$; по поверхности песчаной насыпи укладывается пенопласт толщиной 0,2 м. с термическим сопротивлением $R_{is} = 5,71 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Характеристики песчаной насыпи: $L_v = 8370 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$, $\lambda_f = 1,45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $\lambda_{th} = 1,20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Климатические характеристики: $\Omega_w = -134000 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$, $\Omega_s = 44500 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ч}$, $R_s = 2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, среднезимняя скорость ветра равна 2,4 м/с.

Требуется определить: T_n , d_{th} , H_d .

Последовательность расчета.

- 1) По табл. 7.3 интерполяцией находим коэффициент теплообмена $\alpha_{out} = 26,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.
- 2) По формуле (7.12) определяем внутреннее термическое сопротивление термосифона $R_{in} = \frac{1}{26,9 \cdot 1,5} = 0,0248 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.
- 3) По табл. 7.4 интерполяцией находим поправочный коэффициент $k_h = 0,773$.
- 4) По формуле (7.10) находим безразмерный параметр

$$B = \frac{1,45 \cdot 0,0248}{0,038 \cdot 0,773} = 1,224.$$

5) По формуле (7.9) – параметр $\chi = \frac{3}{\pi}(1,224 + 0,5 \cdot \ln \frac{3}{\pi \cdot 0,038}) = 2,708$ м.

6) Задаемся произвольным значением $T_n = -10,2$ °С (средняя годовая температура наружного воздуха) и по формуле (7.14) вычисляем поправочный коэффициент $\mu = 1 + 0,033(-10,2) = 0,663$.

7) По формуле (7.13) вычисляем глубину сезонного оттаивания песчаной насыпи

$$d_{th} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,2 \cdot 44500}{8370} \cdot 0,663^2 + (1,2 \cdot 5,71)^2} - 1,2 \cdot 5,71 = 0,398 \text{ м.}$$

8) По формуле (7.11) определяем параметр $\xi = 0,5 \cdot 0,398 \cdot (0,398 + 2 \cdot 1,45 \cdot (2 + 5,71)) / 2,708 = 1,673$ м².

9) По формуле (7.8) вычисляем среднегодовую температуру грунта на подошве слоя сезонного оттаивания

$$T_n = (-134000 + \frac{8370}{1,45} \cdot 2,708 \cdot 1,673) / 8760 = -14,59$$
 °С.

Поскольку вычисленная температура оказалась ниже принятой в расчет температуры $-10,2$ °С, расчет, начиная с п. 6, повторяем, добиваясь подбором совпадения принятой в расчет и вычисленной температуры T_n (допускается различие не более $0,5$ °С). В нашем случае это будет температура $T_n = -14,87$ °С; ей соответствует глубина сезонного оттаивания песчаной насыпи $d_{th} = 0,237$ м.

10) Расчет завершаем определением по формуле (7.15) необходимой высоты песчаной насыпи $H_d = 0,237 + 0,038 + 0,2 = 0,475$ м. Принимаем высоту насыпи равной $0,5$ м.

Ответ: $T_n = -14,87$ °С; $d_{th} = 0,24$ м; $H_d = 0,5$ м.

Из результатов проведенного расчета следует два важных вывода:

- охлаждающая подсыпка обеспечивает температуру грунта ниже средней годовой температуры воздуха, что позволяет сохранять мерзлое состояние грунтов даже тогда, когда вследствие потепления климата среднегодовая температура воздуха станет положительной;
- небольшая толщина охлаждающей подсыпки позволяет размещать ее внутри вентилируемых подполий зданий.

Стабилизация границы оттаивания ММГ под зданием, построенным с использованием грунтов основания по принципу II, с помощью охлаждающего контура

Если по данным диагностики установлено, что оттаивание ММГ под зданием превосходит или превзойдет в ближайшем будущем проектное

значение, то исправить положение можно, установив по периметру здания с определенным шагом и на определенную глубину вертикальные парожидкостные термосифоны или замораживающие колонки (воздушные или рассольные). В этом случае по периметру здания создается охлаждающий контур, который отводит «лишнее» тепло от здания и тем компенсирует потерю теплоотводящей способности дневной поверхности, расположенной вне здания. Граница оттаивания в этом случае стабилизируется на том уровне, который был до создания контура.

На рис. 7.4 показано это устройство на одном из деформирующихся зданий в г. Воркута. Здесь охлаждающая система представлена вертикальными парожидкостными термосифонами, установленными с шагом 3 м по



Рис. 7.4 Охлаждающий контур на одном из деформирующихся зданий в Воркуте (Фото Л.Н. Хрусталева)

всему периметру здания на глубину 10 м. В общем случае шаг расстановки термосифонов, глубина их погружения и расстояние от стен здания назначаются расчетом в зависимости от интенсивности потепления климата. Расчеты показывают, что глубина погружения термосифонов должна быть не меньше полуширины здания, а шаг их расстановки не более 3.0 м. В аварийных случаях по фактическим значениям глубины оттаивания под серединой и краем здания находят параметры охлаждающего контура. Та-

кая обратная задача является довольно сложной и решается перебором решений прямой задачи, к изложению которой мы перейдем.

Расчет охлаждающего контура. Целью расчета является определение глубины оттаивания ММГ под серединой H_c и краем H_k здания, по периметру которого установлен охлаждающий контур (рис. 7.5). Расчет осуществляется при допущении, что охлаждающий контур представляет собой узкую бесконечную щель, вытянутую вдоль двух сторон бесконечного по длине здания, что позволяет свести трехмерную задачу к двухмерной и с помощью конформного преобразования получить ее решение.

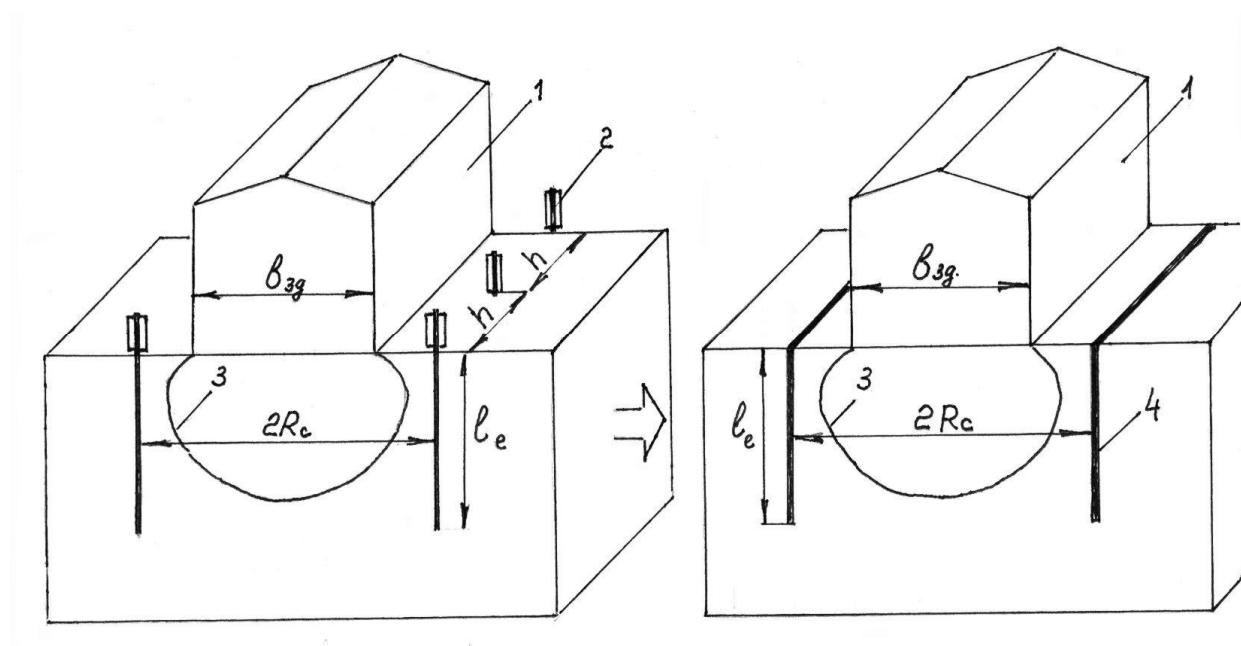


Рис 7.5 Расчетная схема здания с охлаждающим контуром.
1 - здание; 2 - термосифоны; 3 - граница оттаивания мерзлых грунтов;
4 - охлаждающий контур

Расчетная формула имеет вид (Хрусталеv, 2005):

$$H_{c,k} = \xi_{c,k}^* \cdot b_{30}, \quad (7.16)$$

где $\xi_{c,k}^*$ – безразмерная глубина залегания ММГ под серединой ξ_c^* и краем ξ_k^* здания, определяется по номограмме на рис. 7.6 в зависимости от относительного расстояния охлаждающего контура от середины здания $R_e^* = \frac{R_e}{b_{30}}$,

относительной глубины погружения охлаждающих колонок $l_e^* = \frac{l_e}{b_{30}}$ и без-

размерной температуры на контуре $\beta_e = -\frac{\lambda_f \cdot T_e}{\lambda_{th} \cdot T_1}$ (T_e , T_1 – средние годовые температуры, соответственно, на охлаждающем контуре и на поверхности грунта под зданием).

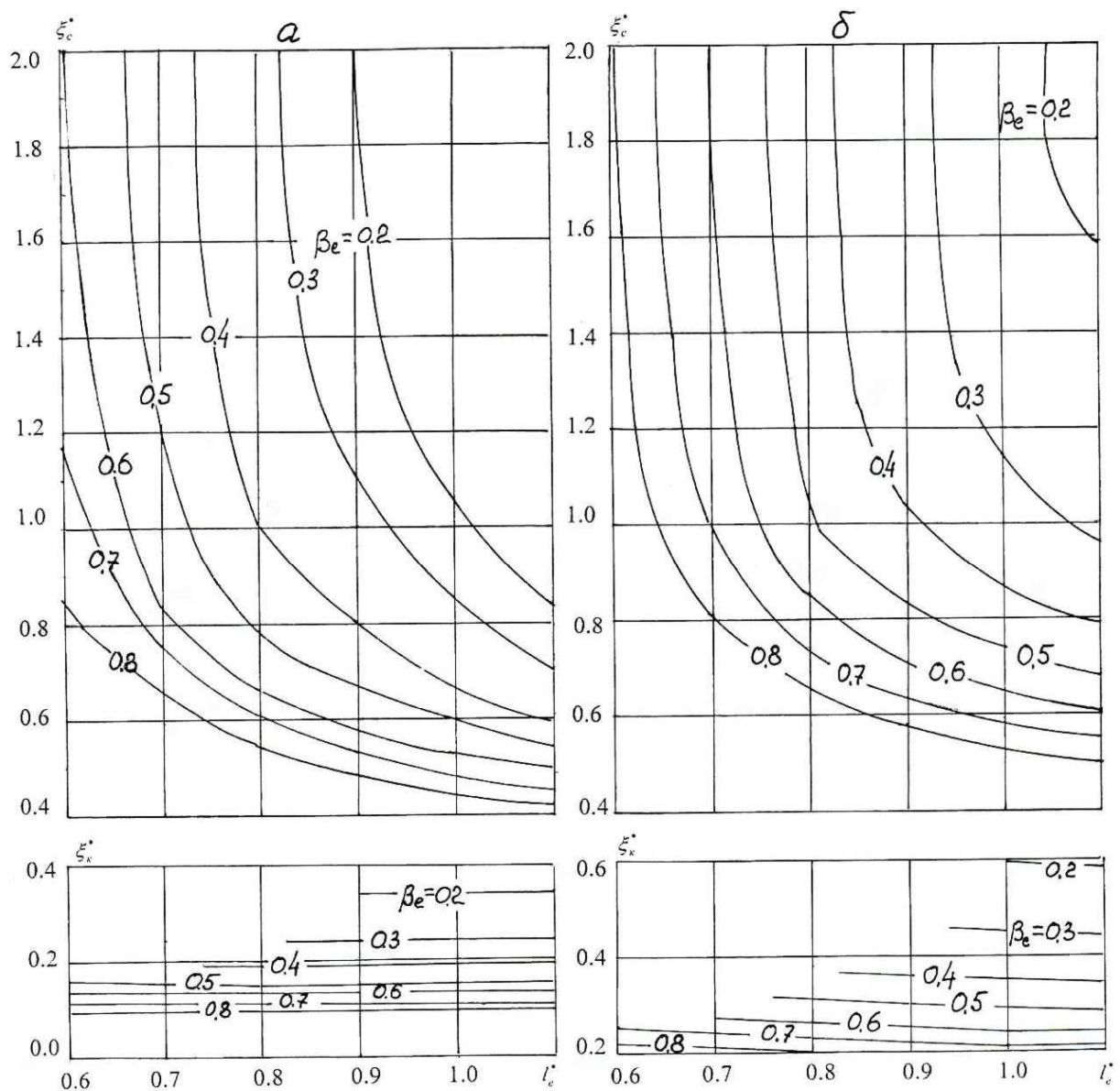


Рис. 7.6 Номограмма для расчета относительной глубины залегания ММГ под серединой ξ_c^* и краем ξ_k^* здания при наличии охлаждающего контура:
 а – при $R_e^* = 0,625$; б - $R_e^* = 0,75$

Средняя годовая температура на охлаждающем контуре определяется

по формулам:
$$T_e = \frac{C_e \cdot T_{out} - S1 \cdot T_1 \cdot \frac{\lambda_{th}}{\lambda_f}}{C_e + 2 \cdot S2}, \quad (7.17)$$

$$C_e = \frac{\pi \cdot d_e \cdot l_e}{\lambda_f \cdot R_{in} \cdot h_e}, \quad (7.18)$$

$$S1 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[\frac{(A3 + A1) \cdot (A2 - A3)}{(A1 - A3) \cdot (A2 + A3)} \right], \quad (7.19)$$

$$S2 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[\frac{(A1 - 1) \cdot (A2 + 1) \cdot (A4 + A1) \cdot (A4 - A2)}{(A1 + 1) \cdot (A2 - 1) \cdot (A4 - A1) \cdot (A4 + A2)} \right], \quad (7.20)$$

$$A1 = ch \left[\frac{\pi}{2 \cdot R_e} \cdot (l_e - \delta_e) \right], \quad (7.21)$$

$$A2 = ch \left(\frac{\pi}{2 \cdot R_e} \cdot \delta_e \right), \quad (7.22)$$

$$A3 = \sin \left(\frac{\pi}{4 \cdot R_e} \cdot b_{зд} \right), \quad (7.23)$$

$$A4 = ch \left(\frac{\pi}{2 \cdot R_e} \cdot l_e \right), \quad (7.24)$$

где T_{out} – средняя годовая температура атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; d_e – наружный диаметр охлаждающей колонки, м; δ_e – толщина стенки охлаждающей колонки, м; R_{in} – внутреннее термическое сопротивление охлаждающей колонки теплообмену, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, определяемое для парожидкостных термосифонов по формуле (7.12), для воздушных и рассольных установок – по формуле (7.25), для жидкостных термосифонов – по формуле (7.26); $ch(x)$ – гиперболический косинус, $ch(x) = 0,5 \cdot (e^x + e^{-x})$.

$$R_{in} = \frac{1}{\alpha_{in}}, \quad (7.25)$$

$$R_{in} = \frac{S_e}{\alpha_{out} \cdot S_c} + \frac{1}{\alpha_{in}}, \quad (7.26)$$

где α_{in} – коэффициент теплообмена между рабочим телом и внутренней поверхностью трубы, для жидкого рабочего тела принимается $116 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$, для газообразного – $25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$; остальные обозначения те же, что и в формуле (7.12).

Поясним порядок расчета глубин оттаивания ММГ под зданием по приведенным формулам примером.

Пример 2. Постановка задачи. Требуется рассчитать глубину оттаивания ММГ под серединой H_c и краем H_k здания, по периметру которого установлен охлаждающий контур при следующих исходных данных: Здание прямоугольной формы длиной $l_{зд} = 100$ м и шириной $b_{зд} = 12$ м; средняя годовая температура поверхности грунта под зданием $T_1 = 12$ $^{\circ}\text{C}$. Охлаждающий контур выполнен из парожидкостных термосифонов. Диаметр испарителя термосифона (диаметр охлаждающей колонки) $d_e = 0,108$ м, толщина его стенки $\delta = 0,003$ м, диаметр конденсатора – $0,057$ м, отношение площади поверхности конденсатора к площади поверхности испарителя $S_c/S_e = 1$; конденсатор имеет оребрение, хладоноситель термосифона –

аммиак; глубина погружения в грунт испарителя термосифона $l_e = 12$ м, шаг расстановки термосифонов $h_e = 3$ м. Основание здания представлено суглинками с коэффициентами теплопроводности в талом и мерзлом состоянии, соответственно: $\lambda_{th} = 1,33$ Вт/(м·°C); $\lambda_f = 1,51$ Вт/(м·°C). Климатические параметры района расположения здания: средняя годовая температура атмосферного воздуха $T_{out} = -5,7$ °C, средняя годовая скорость ветра $v = 5$ м/с. Требуется определить H_c, H_k .

Последовательность расчета.

1) По формулам (7.17) – (7.24) находим температуру контура, предварительно по формуле (7.24) с использованием табл. 7.3 находим

$$R_{in} = \frac{1}{54,5 \cdot 1} = 0,0183 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт};$$

$$C_e = \frac{\pi \cdot 0,108 \cdot 10,8}{1,51 \cdot 0,0183 \cdot 3} = 44,20; \quad A1 = ch \left[\frac{\pi}{2 \cdot 9} \cdot (10,8 - 0,003) \right] = 3,366; \quad A2 = ch \left(\frac{\pi}{2 \cdot 9} \cdot 0,003 \right) = 1 + 6,9 \cdot 10^{-8};$$

$$A3 = \sin \left(\frac{\pi}{4 \cdot 9} \cdot 12 \right) = 0,866; \quad A4 = ch \left(\frac{\pi}{2 \cdot 9} \cdot 10,8 \right) = 3,369;$$

$$S1 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[\frac{(0,866 + 3,366) \cdot (1 + 6,9 \cdot 10^{-8} - 0,866)}{(3,366 - 0,866) \cdot (1 + 6,9 \cdot 10^{-8} + 0,866)} \right] = -0,67;$$

$$S2 = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left[\frac{(3,366 - 1) \cdot (1 + 6,9 \cdot 10^{-8} + 1) \cdot (3,369 + 3,366) \cdot (3,369 - 1 - 6,9 \cdot 10^{-8})}{(3,366 + 1) \cdot (1 + 6,9 \cdot 10^{-8} - 1) \cdot (3,369 - 3,366) \cdot (3,369 + 1 + 6,9 \cdot 10^{-8})} \right] = 7,54;$$

$$T_e = \frac{44,2 \cdot (-5,7) + 0,67 \cdot 12 \cdot 1,33 / 1,51}{44,2 + 2 \cdot 7,54} = -4,13 \text{ °C}.$$

2) Определяем безразмерные параметры

$$R_e^* = \frac{9}{12} = 0,75; \quad l_e^* = \frac{12}{12} = 1; \quad \beta_e = -\frac{1,51 \cdot (-4,13)}{1,33 \cdot 12} \approx 0,4.$$

3) Используя вычисленные безразмерные параметры по номограмме на рис. 7.5 находим

$$\xi_c^* = 1,04; \quad \xi_k^* = 0,36.$$

4) По формуле (7.16) определяем: $H_c = 1,04 \cdot 12 = 12,48$ м; $H_k = 4,32$ м

Ответ: Глубина оттаивания ММГ под серединой здания 12,48 м; под краем – 4,32 м.

Из данного примера следует, что охлаждающий контур может быть использован как ремонтное мероприятие для деформирующихся зданий, построенных с использованием грунтов основания по принципу II, в случае растепления их оснований. В частности, он с успехом был применен для стабилизации ММГ в основании 33-х капитальных промышленных и гражданских зданий в городе Воркута.

Выводы.

1. Во избежание деформаций инженерных сооружений в условиях изменяющегося климата за температурой грунтов в их основании и климатом должны вестись постоянные наблюдения. Это позволит по разработанной нами компьютерной программе ТЕМ осуществить диагностику состояния геотехнических систем в настоящий момент и в ближайшее будущее и по результатам диагностики заблаговременно принять управляющие решения по исправлению негативной ситуации при ее возникновении.

2. Управляющие решения в случае потепления климата, процесса наиболее распространенного в криолитозоне, должны быть направлены на максимальное использование естественного или искусственного «холода». При этом в качестве средств управления можно рекомендовать охлаждающие подсыпки для сооружений, возведенных с использованием грунтов основания по принципу I, и охлаждающие контура для сооружений, возведенных с использованием грунтов основания по принципу II.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный нами прогноз среднегодовой температуры воздуха для территорий Европейского Севера, Западной, Средней и Восточной Сибири свидетельствует о том, что на всех рассматриваемых территориях в будущем произойдет антропогенное повышение средней годовой температуры воздуха с интенсивностью, возрастающей с севера на юг и с запада на восток. На Европейском Севере линейный тренд повышения средней годовой температуры воздуха составит от 0,005 до 0,008 °С/год, в Западной Сибири – от 0.003 до 0.027 °С/год, в Средней и Восточной Сибири – от 0.011 до 0.088 °С/год.

Повышение температуры воздуха приведет к повышению температуры пород, которое в разных регионах будет протекать с разной интенсивностью. По интенсивности изменения температуры пород регионы можно расположить в следующий возрастающий ряд Европейский Север – Западная Сибирь – Средняя и Восточная Сибирь.

На Европейском Севере будет отмечаться лишь незначительное повышение температуры пород, однако за счет естественной динамики климата в отдельные годы возможно как повышение, так и понижение температуры пород. Во всех районах Западной, Средней и Восточной Сибири произойдет деградация многолетнемерзлых пород (ММП) с возрастающей интенсивностью с севера на юг и с запада на восток. Она выразится в повышении средней годовой температуры ММП, увеличении сезонного оттаивания и его трансформации в многолетнее и в сокращении мощности мерзлых толщ.

В условиях потепления климата и деградации ММП надежность объектов инфраструктуры снизится, что, в свою очередь, приведет к снижению их долговечности и массовым деформациям. Наиболее уязвимыми к климатическим изменениям окажутся объекты, построенные с использованием грунтов оснований по принципу I.

В связи с этим перед инженерной геокриологией в настоящее время стоит проблема сохранения надежности уже построенных в криолитозоне объектов и обеспечение надежности вновь возводимых с минимальными материальными и трудовыми затратами. Решение этой проблемы возможно лишь с позиций теории надежности геотехнических систем путем управления техногенными рисками при промышленном и гражданском освоении рассматриваемых регионов.

К сожалению, существующие нормативные документы, основанные на детерминистических расчетах, не позволяют учитывать случайную изменчивость всей расчетной информации и на этой основе оценивать опасности (риски) возможных аварий сооружений до окончания срока их эксплуатации и предписывают принимать проектные решения на основе тех-

нико-экономического сравнения вариантов по начальной стоимости. При этом упускается такой важный аспект, как надежность проектируемого объекта. Очевидно, что объекты, отличающиеся по надежности, не могут сравниваться по начальной стоимости. В сравнении обязательно должен участвовать стоимостной эквивалент надежности – цена риска, которая определяется только с позиций вероятностно-статистических расчетов. Поэтому вероятностно-статистические расчеты должны стать неотъемлемой частью проектирования, особенно в условиях глобального изменения климата – процесса случайного и плохо прогнозируемого. Первым шагом в этом направлении является совмещение нормативных детерминистических методов расчета с вероятностными. «Мостом» между ними служит коэффициент надежности K_H , который в нормативной литературе назначается директивным порядком. Такого ненормального положения можно избежать, если воспользоваться разработанной нами методикой вероятностно-экономического вычисления коэффициента и построенными по этой методике картами изолиний K_H . Практически это означает, что расчеты оснований зданий по первому предельному состоянию (по несущей способности) следует осуществлять по формулам СНиП 2.02.04-85, где коэффициент надежности принимать по картам изолиний K_H . К сожалению, карты построены только для зданий на многолетнемерзлых грунтах с открытыми вентилируемыми подпольями и на свайных фундаментах. Построение подобных карт для других сооружений – дело будущего.

Кроме этого, проектирование сооружений на многолетнемерзлых грунтах в условиях климатических изменений можно осуществлять непосредственно с помощью разработанных нами компьютерных программ типа NAST, PIPE и RW. В основу этих программ положен метод Монте-Карло, который заменяет стохастическую задачу многократным решением (десятки и сотни раз) детерминистической задачи. По результатам решения составляется стоимостная инженерно-геокриологическая карта, которая позволяет на научной основе осуществлять выбор принципа использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований зданий, способа фундаментостроения и типа фундамента, планировочного решения застройки, трассы и способа прокладки трубопровода, конструкцию взлетно-посадочных полос аэродромов. Нет сомнения, что ее использование в проектировании является эффективным средством ускорения технического прогресса в строительстве на многолетнемерзлых грунтах.

Во избежание деформаций уже построенных инженерных сооружений в условиях изменяющегося климата за температурой грунтов в их основании и климатом должны вестись постоянные наблюдения. Это позволит по разработанной нами компьютерной программе ТЕМ осуществить диагностику состояния геотехнических систем в настоящий момент и в ближайшее будущее и по результатам диагностики заблаговременно при-

нять управляющие решения по исправлению негативной ситуации при ее возникновении.

Управляющие решения должны быть направлены на максимальное использование естественного или искусственного «холода». При этом в качестве средств управления можно рекомендовать охлаждающие подсыпки для сооружений, возведенных с использованием грунтов основания по принципу I, и охлаждающие контура для сооружений, возведенных с использованием грунтов основания по принципу II.

ЛИТЕРАТУРА

- Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э., Павлов А.В.* Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке // Криосфера Земли, т. 3, № 4. 1999. С. 15-25.
- Антропогенные изменения климата* / Под ред. М.И. Будыко и Ю.А. Израэля. Л., Гидрометеиздат, 1987, 406 с.
- Атлас СССР*, ГУГН, 1985. 259 с.
- Баулин В.В.* Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР. М.: Недра, 1985. 176 с.
- Березин М.С., Жидков Н.П.* Методы вычислений. М., Наука, 1966. 632 с.
- Биянов Г.Ф., Когодовский О.А., Макаров В.И.* Грунтовые плотины на вечной мерзлоте. Якутск. Изд. Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1989. 153 с.
- Борзенкова М.И., Будыко М.И., Бютнер Э.К. и др.* Антропогенные изменения климата / Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля / Л.: Гидрометеиздат, 1987. 407 с.
- Борисенков Е.П.* Изменение климата и человек. М: Знание, 1990, 62 с.
- Брукс К., Карузерс Н.* Применение статистических методов в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1963. 351 с.
- Будыко М.И., Израэль Ю.А., Янишин А.Л.* Глобальное потепление и его последствия // Метеорология и гидрология, № 12. 1991. С. 5-10.
- Будыко М.И., Борзенкова И.И. и др.* Предстоящие изменения регионального климата // Известия РАН, сер. Географическая, № 4, 1992. С. 36-52.
- Величко А.А., Нечаев В.П.* К оценке динамики зоны многолетней мерзлоты в Северной Евразии при глобальном потеплении климата // ДАН, т. 324, № 3. 1992. С. 667-671.
- Вентцель Е.С.* Введение в исследование операций. М: Сов. радио, 1964. 388 с.
- Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов* / Под ред. Е.С. Мельникова и С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002. 402 с.
- Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И., Хрусталева Л.Н.* Районирование территории криолитозоны по степени влияния техногенных геокриологических процессов на экологические условия // Криосфера Земли. Новосибирск, № 1, 1997. С. 30-39.
- Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции* / Под ред. Е.С. Мельникова. Новосибирск: Наука, 1983. 199 с.
- Геокриологический прогноз для Западно-Сибирской газоносной провинции* / Под ред. С.Е. Гречищева. Новосибирск: Наука, 1983. 182 с.
- Геокриология СССР. Европейская территория СССР* / Под ред.

Э.Д. Ершова. М., Недра, 1988. 358 с.

Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 515 с.

Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.

Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 414 с.

Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Под ред. Э.Д. Ершова. Картпредприятие. Винница. Украина 1991. 16 л.

Геокриологические опасности / Под ред. Л.С. Гарагули, Э.Д. Ершова. М: Изд. фирма «КРУК», 2000. 315 с.

Гребенец В. И., Садовский А.В. Потепление климата и тепловой режим основания северного города // Основание, фундаменты и механика грунтов, № 5, 1993. С. 27-30.

Гриб Н.К., Поляк И.И. Временная изменчивость среднегодовых значений температуры воздуха // Тр. ГГО, вып. 374. Л: Гидрометеиздат, 1976. С. 71-94.

Десяткин В.Н., Мельников В.П., Павлов А.В. Экспериментальное изучение погрешностей измерений температуры горных пород в неглубоких скважинах. В кн. «Методика и техника геокриологических исследований: Новосибирск, Наука, 1988. С. 101-110.

Дроздов О.А., Григорьева А.С. Многолетние циклические колебания атмосферных осадков на территории СССР. Л: Гидрометеиздат, 1989. 159 с.

Дроздов О.А. Климатология. Л: Гидрометиздат, 1989. 568 с.

Долгих Г.М. и др. Система температурной стабилизации оснований // Наука в СССР, № 2. 1991. С. 118-119.

Дубровин В.А., Караванова М.Е., Куликов А.И., Федосеев А.В., Федосеева А.Р. Автоматизированные средства измерений и геокриологические базы данных в системе ГМГС. В кн. «Материалы Первой конференции геокриологов России». М., Изд-во МГУ, 1996. С. 457-465.

Ершов Э.Д., Максимова Л.Н., Медведев А.В. и др. Реакция мерзлоты на глобальные изменения климата // Геоэкология. № 5. 1994. С. 11-24.

Ершов Э.Д., Пармузин С.Ю., Шаталова Т.Ю. и др. Оценка изменчивости температурного режима и состояния пород на основе анализа климатических данных – В кн.: Материалы Первой конференции геокриологов России, кн. 1. – М., МГУ, 1996. С. 300- 309.

Жуков В.Ф. Предпостроечное протаивание многолетнемерзлых горных пород при возведении на них сооружений. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 117 с.

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, № 3. 1999. С. 18-26.

Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорология и гидрология, № 1, 2002. С. 10-18.

Кауркин В. Д. Прогноз термического режима многолетнемерзлых пород и оценка надежности геотехнических систем на территории Республики Саха - Якутия в связи с возможными климатическими изменениями. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. геол.-минерал. наук, 2005. 26 с.

Комаров И.С. Накопление и обработка информации при инженерно-геологических исследованиях. М.: Недра, 1972. 295 с.

Кондратьева К.А. Мерзлотно-температурная карта Новой Земли в масштабе 1:250000. Мерзлотные исследования, вып. XVIII. М. Изд-во МГУ, 1979. С. 80-100.

Кондратьева К.А., Пармузин С.Ю., Петрожицкий И.И. Геоэкологическое картирование и его роль в изучении Новой Земли для целей захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология, № 6. 1996. С. 83-92.

Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.

Кутасов И.М., Девяткин В.Н. Экспериментальные исследования неглубоких конвектирующих скважин. В кн. «Тепловые процессы в мерзлых горных породах». М., Физматгиз, 1964. С. 143-150.

Кроник Я.А. Аварийность и безопасность природно-технических систем в криолитозоне // Труды Второй конференции геоэкологов России. Изд-во МГУ, т. 4, 2001. С. 138 - 146.

Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: Изд-во МГУ, 1974. 433 с.

Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Романовский Н.Н., Максимова Л.Н., Чижев А.Б. Методика мерзлотной съемки. М., Изд-во МГУ, 1979. 359 с.

Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., Гостехиздат, 1952. 600 с.

Максимова Л.Н., Чижев А.Б. Методика мерзлотной съемки. М., Изд-во МГУ, 1979. 359 с.

Максимова Л.Н. О климатических ритмах в связи с геоэкологическим прогнозом // Мерзлотные исследования, вып. XXI. М., Изд-во МГУ, 1983. С. 63-72.

Минкин М.А. Основания и фундаменты сооружений на вечноммерзлых грунтах. Учебное пособие. М.: ГАСИС, 2005. 213 с.

Новиков Ф.Я. Температурный режим мерзлых пород за крепью шахтных стволов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 150 с.

Остроумов Г.П. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. М, Л., Гостехиздат. 1952.

Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, Книжное изд-во, 1975. 304 с.

Павлов А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли, т. I, № 1. 1997. С. 47-58.

Павлов А.В. Реакция криолитозоны на современные и ожидаемые в XXI веке климатические изменения // Разведка и охрана недр, № 5. 2001. С. 8-14.

Павлов А.В. Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз // Изв. РАН. Сер. геогр. № 6. 2003. С. 39-50.

Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. Альбом мелкомасштабных карт. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2005. 54 с.

Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. 229 с.

Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли, т. XIII, № 4. 2009. С. 32-39.

Пармузин С.Ю., Кузнецова Е.К., Вервельский А.А., Калинин В.Н., Петрожицкий И.И. Динамика температурного поля многолетнемерзлых пород Южного острова Новой Земли (результаты математического моделирования). Мат-лы второй конференции геокриологов России. Том 2. Динамическая геокриология. Изд-во МГУ, 2001. С. 235-241.

Полозова Л.Г. Анализ цикличности колебаний средней месячной температуры воздуха в северном полушарии // Тр. ГГО, вып. 269. Л: Гидрометеиздат, 1970. С. 36-73.

Попов М.М. Термометры и калометрия. М., Изд-во МГУ, 1954. 543 с.

Порхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. М.: Наука, 1970. 208 с.

Программа расчета надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах NAST / Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П., Яковлев С.В. Свидетельство № ПОО6454. Госфонд алгоритмов и программ, 1983.

Программа расчета надежности взлетно-посадочной полосы на вечномерзлых грунтах RW / Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П. Свидетельство № 950253. РосАПО, 1995.

Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM / Хрусталева Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Яковлев С.В. Свидетельство № 940281. РосАПО, 1994.

Программный комплекс «Температурный мониторинг» ТЕМ /Хрусталева Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Емельянова Л.В./ Свидетельство № 950252 РосАПО, 1995.

Рекомендации по расчету свайных фундаментов на вечномерзлых грунтах на горизонтальное сейсмическое воздействие. Красноярск. Красноярский ПромстройНИИпроект, 1974. 17 с.

Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах / Под ред. Ю.Я. Велли, В.В. Докучаева, Н.Ф. Федорова. Л.: Стройиздат, 1977. 552 с.

СНиП 2.02.01-83. Основания зданий сооружений. М.: Стройиздат, 1985. 41 с.

СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. М.: Стройиздат, 1986. 46 с.

СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Стройиздат, 1990. 53 с.

Сумгин М.И. Вечная мерзлота в пределах СССР: М., Изд-во АН СССР, 1937. 379 с.

Тартаковский Г.А. Строительная механика трубопроводов. М.: Недра, 1976. 224 с.

Ушкалов В.П. Исследование работы протаивающих оснований и их расчет по предельным деформациям сооружений. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 219 с.

Указания по производству инженерно-геологических изысканий в районах распространения вечномерзлых грунтов. М., Госстрой РСФСР, 1970. 102 с.

Хрусталева Л.Н. Численный метод решения задачи промерзания-оттаивания грунта // Изв. Сибирского отд. АН СССР, серия техн. наук, № 6, вып. 2, 1966. С. 20-32.

Хрусталева Л.Н. Температурный режим вечномерзлых грунтов на застроенной территории. М., Наука, 1971. 168 с.

Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П. Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 1988. 253 с.

Хрусталева Л.Н., Козлов А.Н. Планирование инженерных изысканий в криолитозоне по результатам предварительных исследований. // Инженерная геология № 2, 1990.

Хрусталева Л.Н., Никифоров В.В. Стабилизация вечномерзлых грунтов в основании зданий. Новосибирск. Наука, 1990. 353 с.

Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П. Изменение мерзлотных условий при глобальном потеплении климата и устойчивость зданий в криолитозоне // Геоэкология, № 5, 1993. С. 30-36.

Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П., Емельянова Л.В. Надежность и долговечность оснований инженерных сооружений на вечномерзлых грунтах в условиях глобального потепления климата // Основания, фундаменты и механика грунтов, №3, 1993. С.10-13.

Хрусталева Л.Н., Емельянова Л.В. Приближенный аналитический расчет трехмерного нестационарного температурного поля в вечномерзлых грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 6, 1996. С. 22-23.

Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П. Расчет температуры вечномёрзлого грунта, охлаждаемого горизонтальными термосифонами малого диаметра // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1995. № 5. С. 22-25.

Хрусталева Л.Н., Медведев А.В., Пустовойт Г.П. Многолетние изменения температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // Криосфера Земли, т. IV, № 3, 2000. С. 35-41.

Хрусталева Л.Н., Гарагуля Л.С., Гордеева Г. И. и др. Прогноз среднегодовой температуры воздуха на территории Саха (Якутия) по результатам ретроспективного анализа // Криосфера Земли, т. VI, № 2, 2002. С. 66-74.

Хрусталева Л.Н., Емельянова Л.В., Кауркин В.Д. Усовершенствование методики прогноза ожидаемых мерзлотно-климатических изменений на севере Западной Сибири // Криосфера Земли, № 2, 2003. С. 23-29.

Хрусталева Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2005. 544 с.

Шендер Н.И., Романовский В.Е., Тетельбаум А.С. Предсказание природной цикличности климата в Якутске и Фербенксе // Наука и образование, № 2, 1999. С. 24-29.

Шполянская Н.А. Мерзлая зона литосферы Западной Сибири и тенденция ее развития. М., 1981. 168 с.

Яковлев К.П. Математическая обработка результатов измерений. М., Гостехиздат, 1953. 384 с.

Haigh J.D., Pyle J.A. Ozone perturbation experiments in a two-dimensional circulation model. J. Roy Meteorol. Soc., vol. 457, № 12, 1982. pp 35-38.

Lacis A. et al. Greenhouse effects of frame gases, 1970-1980 // Geophys. Res. Lett., vol. 8, 1981. pp 1035-1038.

Manabe S., Wetherald R. On the distribution of climate change resulting from an increase in CO₂ content of the atmosphere. J. Atmos. Sci., vol. 37, 1980. pp 99-118.

Nelson F. E., Lachenbruch A.H., et al. Permafrost and changing climate. /In: Permafrost, Sixth Int. Conf. Proceedings (vol. 2). – Beijing, China, South China Univ. of Technology Press, 1993. pp. 987-1005.

Pavlov A.V. Evolution of soil and ground thermal state in Permafrost in connection with contemporary global Changes of Climate // Proceedings of the First Int. Conf. on cryopedology, Pushchino, 1992. pp. 168-173.

Vlasov V.P., Perlshtein G.Z., Khrustalev L.N. The Use of Heat Pumps for Boilding in Permafrost Areas // In Proceeding Second International Conference on Arctic Marginc. Magadan, September. 1994.

Приложение 1

Параметры для прогнозной формулы температуры воздуха ряда метеостанций России

Метеостанция			Фактические годы наблюдений за температурой воздуха	Метеостанция, к которой был привязан короткий ряд наблюдений за температурой воздуха	Расширенный ряд наблюдений за счет привязки	параметры к прогнозной формуле 3.8 (усл. обозначения см. к формулам 3.4 и 3.8)					
название	широта, град	долгота, град				$T_{cp}, ^\circ C$ до t_p	рубежный год t_p	тренд g, $^\circ C/\text{год}$	поправка, Eta, $^\circ C$	сред. квад. отклонение σ_η	количество гармоник N
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Европейский Север											
Малые Кармакулы (о. Новая Земля)	72,4	52,7	1897-1998	нет	нет	-5,10	1984	0,001	-0,116	1,04	14
Амдерма	69,8	61,7	1934-2000	Малые Кармакулы	1897-2000	-6,98	1968	0,005	0,071	1,26	14
Мурманск	69,0	33,0	1919-1993	Архангельск	1814-1999	-0,29	1971	0,033	0,090	0,95	14
Канин Нос	68,7	43,3	1916-2001	нет	нет	-0,80	1965	0,004	-0,208	0,45	14
Кола	68,8	33,0	1891-1982	Архангельск	1814-1999	-0,52	1970	0,035	0,004	1,01	14
Нарьян-Мар	67,6	53,0	1927-1999	нет	нет	-3,45	1974	0,006	-0,273	1,00	14
Воркута	67,5	64,0	1937-1999	Нарьян-Мар	1927-1999	-5,70	1970	0,008	-0,405	0,82	14
Архангельск	64,6	40,5	1814-1999	нет	нет	0,65	1971	0,007	0,156	1,19	9
Кемь	65,0	34,8	1891-1987	Архангельск	1814-1999	0,71	1976	0,006	0,163	1,04	14
Троицко-Печорское	62,7	56,2	1891-1993	нет	нет	-1,16	1973	0,014	-0,120	0,90	14
Сыктывтар	61,7	50,8	1895-1999	нет	нет	0,45	1972	0,025	0,029	0,76	13
Бисер	58,5	58,9	1891-1992	нет	нет	-0,87	1966	0,026	-0,040	0,58	14
Западная Сибирь											
о. Диксон	73,5	80,2	1917-2001	нет	нет	-11,4	1979	0,009	-0,100	1,15	14
о. Белый	73,3	70,7	1934-1987	Марре-Сале	1928-2001	-10,3	1976	0,006	-0,350	1,16	14
Гыдойма	70,9	78,5	1934-1988	Марре-Сале	1928-2001	-10,6	1974	0,009	-0,570	1,09	14
Тамбей	71,5	71,8	1937-2001	о. Диксон	1917-2001	-10,6	1980	0,014	0,046	1,05	14

<i>продолжение приложения 1</i>											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Харасавей	71,2	66,9	1954-1986	Марре-Сале	1928-2001	-8,9	1978	0,003	-0,390	1,06	14
Марре-Сале	69,7	66,8	1928-2001	нет	нет	-7,9	1971	0,009	-0,690	1,18	9
Дудинка	69,5	86,3	1933-2001	нет	нет	-9,9	1978	0,029	-0,088	1,09	11
Тазовский	67,5	78,8	1933-1999	нет	нет	-9,0	1977	0,018	-0,002	0,99	13
Игарка	67,5	86,6	1930-1994	нет	нет	-8,2	1972	0,006	0,023	0,62	14
Салехард	66,6	66,6	1883-2001	нет	нет	-6,4	1979	0,020	0,193	1,03	14
Ныда	66,6	73,0	1948-1988	Салехард	1883-2001	-7,4	1971	0,004	0,032	1,11	14
Туруханск	65,9	88,1	1886-2001	нет	нет	-7,0	1961	0,019	0,052	0,89	14
Надым	65,6	72,5	1955-2000	Салехард	1883-2001	-6,0	1972	0,017	0,060	1,06	14
Тарко-Сале	64,9	77,8	1937-2001	Марре-Сале	1928-2001	-6,3	1975	0,027	0,094	1,07	14
Полуй	66,0	68,7	1950-1988	Салехард	1883-2001	-6,0	1971	0,013	0,031	1,11	14
Верхне-Имбатское	63,2	88,1	1912-1995	Сургут	1891-2001	-5,1	1964	0,030	0,200	0,83	14
Сургут	61,4	73,5	1891-2001	нет	нет	-2,9	1964	0,035	0,099	0,74	14
Ханты-Мансийск	61,1	69,1	1933-1999	нет	нет	-1,5	1976	0,034	0,068	0,74	13
Средняя и Восточная Сибирь											
Саскылах	71,9	114,1	1936-1997	Тикси	1933-2001	-14,1	1981	0,020	-0,469	1,13	13
Тикси	71,7	128,7	1933-2001	нет	нет	-13,1	1981	0,020	-0,087	0,95	9
Кюсюр (Булун)	70,6	127,5	1951-1989	Тикси	1933-2001	-13,6	1980	0,032	-0,166	0,81	14
Чокурдах	70,7	147,9	1940-2001	Тикси	1933-2001	-13,9	1970	0,011	-0,010	0,84	12
Жилинда	70,1	113,8	1942-1994	Тикси	1933-2001	-13,7	1979	0,024	-0,065	1,19	11
Сиктях	69,9	125,1	1952-1989	Тикси	1933-2001	-13,3	1977	0,019	0,056	0,79	14
Саханджа	69,8	128,1	1955-1989	Тикси	1933-2001	-13,9	1977	0,017	-0,008	0,86	14
Депутатский	69,3	139,7	1960-1989	Верхоянск	1886-2001	-15,2	1972	0,032	0,068	0,75	14
Сухана	68,8	117,9	1935-2001	нет	нет	-13,7	1981	0,032	-0,047	1,03	9
Оленек	68,5	112,4	1935-1995	Верхоянск	1886-2001	-13,2	1968	0,022	0,445	0,95	14
Мянгкяра	68,0	123,0	1949-1988	Верхоянск	1886-2001	-12,3	1979	0,033	0,368	0,90	14
Маак	67,8	115,5	1951-1989	Верхоянск	1886-2001	-13,5	1984	0,020	0,450	0,95	14
Верхоянск	67,5	133,3	1886-2001	нет	нет	-15,6	1969	0,033	0,105	0,87	11
Собопол	67,1	126,8	1952-1994	Верхоянск	1886-2001	-11,5	1972	0,036	0,111	0,89	14

<i>продолжение приложения 1</i>											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ярольин	67,1	108,5	1957-1989	Верхоянск	1886-2001	-12,3	1966	0,027	-0,002	0,79	10
Жиганск	66,8	123,4	1930-1995	Верхоянск	1886-2001	-11,7	1968	0,030	-0,034	0,86	12
Шелагонцы	66,3	114,3	1941-2001	Верхоянск	1886-2001	-13,3	1973	0,024	-0,002	0,91	13
Эйк	66,0	117,4	1941-1994	Верхоянск	1886-2001	-11,8	1979	0,033	-0,018	0,96	14
Зырянка	65,8	150,8	1951-1989	Верхоянск	1886-2001	-11,3	1976	0,016	0,483	0,76	14
Бестяхская Звероферма	65,3	124,1	1951-1997	Якутск	1886-2001	-11,8	1966	0,026	0,013	0,77	14
<u>Сюрюн-Кюель</u>	65,0	130,7	1951-1988	Якутск	1886-2001	-11,9	1971	0,037	0,049	0,73	14
Чумпурук	64,2	116,9	1956-1997	Якутск	1886-2001	-10,9	1969	0,033	-0,010	0,82	14
Сого-Хая (Усть-Виллой)	64,3	126,5	1951-1989	Якутск	1886-2001	-10,1	1970	0,036	0,004	0,76	14
Дарпир	64,2	148,0	1951-1985	Оймякон	1886-2001	-13,0	1975	0,044	0,030	0,36	14
Сеген-Кюель	64,0	130,3	1951-1988	Якутск	1886-2001	-9,9	1977	0,058	-0,009	0,84	14
Хатырык-Хомо	64,0	124,8	1957-1989	Якутск	1886-2001	-11,0	1971	0,037	0,054	0,75	14
Сангар	64,0	127,5	1951-1997	Якутск	1886-2001	-10,2	1966	0,025	0,018	0,74	14
Делянكير	63,8	145,6	1951-1989	Оймякон	1930-2001	-16,9	1968	0,027	-0,057	0,28	14
Оймякон	63,3	143,2	1930-2001	нет	нет	-16,5	1971	0,025	0,069	0,45	10
Нюрба	63,3	118,3	1933-1994	Якутск	1886-2001	-8,9	1977	0,043	-0,086	0,98	14
Восточная	63,2	139,6	1951-1989	Оймякон	1930-2001	-13,6	1975	0,046	0,045	0,40	14
Сюльдюкар	63,2	113,6	1951-1988	Якутск	1886-2001	-10,0	1971	0,036	0,007	0,80	14
Западная	62,9	138,5	1951-1989	Оймякон	1930-2001	-11,6	1968	0,034	0,110	0,51	12
Мирный	62,5	114,0	1948-1992	Якутск	1886-2001	-7,8	1971	0,031	0,233	0,85	12
Туой-Хая	62,5	111,2	1951-1989	Якутск	1886-2001	-8,3	1964	0,032	0,326	0,83	9
Якутск	62,1	129,5	1886-2001	нет	нет	-10,3	1977	0,071	0,039	0,77	14
Усть-Мая	60,4	134,5	1894-2001	нет	нет	-10,0	1973	0,042	0,059	0,82	12
Комака	60,2	111,5	1951-1989	Якутск	1886-2001	-7,1	1971	0,037	0,001	0,82	14
Витим	59,5	112,6	1929-1995	Якутск	1886-2001	-5,4	1971	0,040	-0,068	0,78	14
Чульман	56,8	124,9	1928-1994	нет	нет	-9,2	1964	0,088	0,181	0,54	11

Параметры гармоник для прогнозных формул температуры воздуха

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Малые Кармакулы (о. Новая Земля)														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,8	4,0	4,4	4,8	5,1	5,8	6,8	8,0	9,9	12,8	16,0	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,08	0,30	0,34	0,34	0,15	0,29	0,47	0,49	0,19	0,72	0,33	0,56	0,66	1,04
Фаза (φ), рад	2,42	3,17	3,38	2,27	1,23	2,79	0,46	1,30	0,66	0,79	1,25	1,09	0,61	0,03
Амдерма														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,8	3,0	3,4	4,0	4,7	5,1	5,8	6,8	7,5	9,9	14,2	32,1
Амплитуда (A_j), °C	0,22	0,22	0,46	0,30	0,54	0,54	0,40	0,28	0,49	0,23	0,78	0,43	0,88	0,38
Фаза (φ), рад	0,66	0,55	1,03	0,63	1,01	0,84	0,54	0,34	0,53	0,22	0,65	0,27	0,39	0,07
Мурманск														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,9	4,7	5,2	6,6	7,1	7,8	8,8	14,2	18,3	21,4	28,4	128,0
Амплитуда (A_j), °C	0,07	0,12	0,20	0,42	0,30	0,19	0,14	0,25	0,17	0,28	0,21	0,21	0,12	0,59
Фаза (φ), рад	1,03	3,67	1,38	1,44	0,67	1,47	1,46	0,39	0,46	0,29	2,15	0,06	0,35	0,63
Канин Нос														
Период (y_j), лет		2,3	2,4	2,7	3,3	4,0	4,7	5,8	6,7	7,5	9,8	12,8	18,3	64,0
Амплитуда (A_j), °C	0,16	0,32	0,14	0,30	0,43	0,38	0,48	0,79	0,16	0,75	0,22	0,58	0,22	0,26
Фаза (φ), рад	0,67	1,07	0,11	1,88	0,74	2,08	-1,11	1,14	4,09	0,08	-0,09	0,34	8,32	-5,54
Кола														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	4,0	4,8	5,2	6,6	7,1	7,6	8,8	10,7	13,5	21,4	42,7	128,0
Амплитуда (A_j), °C	0,08	0,25	0,21	0,14	0,31	0,10	0,17	0,19	0,14	0,15	0,31	0,27	0,17	0,55
Фаза (φ), рад	1,23	0,83	4,41	0,60	0,74	1,24	1,52	3,13	0,43	0,16	0,22	0,20	0,88	0,48
Нарьян-Мар														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,2	3,5	3,8	5,8	7,1	9,9	11,6	14,2	18,3
Амплитуда (A_j), °C	0,42	0,10	0,39	0,71	0,34	0,45	0,24	0,43	0,62	0,17	0,16	0,12	0,62	0,54
Фаза (φ), рад	2,63	1,14	3,77	4,37	3,90	1,35	1,18	0,49	1,20	2,46	1,49	0,20	0,32	2,29

продолжение приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Воркута														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,7	2,9	3,1	3,6	4,1	4,8	5,8	6,4	7,6	9,9	11,6	14,2
Амплитуда (A_j), °C	0,45	0,37	0,54	0,25	0,50	0,20	0,39	0,43	0,73	0,35	0,36	0,88	0,44	0,18
Фаза (φ_j), рад	2,56	3,99	1,40	4,53	1,93	3,29	2,32	2,42	1,10	1,35	2,71	0,69	1,54	1,19
Архангельск														
Период (y_j), лет	2,1	3,1	7,1	9,5	11,6	14,3	16,0	21,3	52,6					
Амплитуда (A_j), °C	0,04	0,05	0,14	0,18	0,03	0,30	0,12	0,25	0,05					
Фаза (φ_j), рад	0,63	2,48	2,15	3,69	1,39	0,47	1,32	3,43	1,77					
Кемь														
Период (y_j), лет	2,5	3,9	4,7	5,2	6,0	7,5	9,5	10,7	11,6	14,2	18,3	21,40	36,6	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,17	0,18	0,44	0,25	0,23	0,17	0,15	0,12	0,09	0,32	0,22	0,28	0,18	0,06
Фаза (φ_j), рад	0,85	1,27	1,45	0,89	2,24	0,59	3,28	0,62	0,35	0,07	2,40	0,08	3,18	0,18
Троицко-Печорское														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,6	4,6	5,3	6,4	8,0	10,7	12,8	16,0	18,3	22,1	25,6	32,1
Амплитуда (A_j), °C	0,10	0,23	0,13	0,29	0,32	0,19	0,31	0,13	0,57	0,33	0,44	0,24	0,34	0,36
Фаза (φ_j), рад	1,72	3,71	3,99	1,33	0,83	4,58	1,20	3,13	0,35	2,42	1,49	0,25	4,28	3,01
Сыктывтар														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	2,9	4,2	5,6	6,4	7,6	10,7	14,2	16,0	18,3	21,3	31,9	
Амплитуда (A_j), °C	0,14	0,31	0,20	0,10	0,37	0,27	0,33	0,31	0,60	0,38	0,97	0,05	0,14	
Фаза (φ_j), рад	1,86	3,75	0,10	3,22	1,39	4,17	2,69	2,90	0,83	3,18	0,04	0,48	0,70	
Бисер														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	4,1	5,6	6,8	7,5	9,2	9,9	10,7	14,2	16,0	21,4	31,9	42,7
Амплитуда (A_j), °C	0,18	0,05	0,13	0,33	0,20	0,17	0,24	0,09	0,12	0,24	0,14	0,08	0,13	0,17
Фаза (φ_j), рад	2,61	3,33	2,77	0,79	2,20	0,37	0,71	0,08	2,25	0,09	2,12	2,98	1,42	2,17

продолжение приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
о. Диксон														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	2,7	3,1	3,8	4,4	6,1	7,1	8,0	9,2	10,7	14,2	18,3	21,3
Амплитуда (A_j), °C	0,08	0,12	0,54	0,23	0,22	0,11	0,45	0,11	0,60	0,14	0,40	0,11	0,10	0,12
Фаза (φ), рад	2,67	0,81	-1,43	1,27	6,49	1,46	4,47	2,65	0,71	-0,46	4,00	3,57	0,81	-1,55
о. Белый														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	2,7	3,3	3,6	3,9	4,6	5,1	5,6	6,4	7,1	8,5	11,6	18,3
Амплитуда (A_j), °C	0,30	0,13	0,58	0,48	0,03	0,26	0,27	0,27	0,55	0,57	0,76	0,85	0,43	0,35
Фаза (φ), рад	2,96	-0,42	-1,40	0,82	1,29	-0,04	4,23	0,94	1,03	4,57	1,90	2,90	4,10	1,73
Гыдойма														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	2,7	3,1	3,6	3,9	4,6	5,1	5,6	6,4	7,1	9,2	11,6	18,3
Амплитуда (A_j), °C	0,41	0,05	0,75	0,50	0,57	0,54	0,15	0,33	0,24	0,88	0,94	0,85	0,20	0,43
Фаза (φ), рад	2,90	-0,90	-1,51	1,89	-1,00	0,65	-0,72	1,07	0,31	4,61	1,48	-0,68	3,50	0,14
Тамбей														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	2,7	3,1	3,5	3,8	4,4	4,8	5,8	6,4	7,6	9,2	11,6	14,2
Амплитуда (A_j), °C	0,02	0,12	0,60	0,21	0,16	0,26	0,11	0,43	0,53	0,35	0,84	0,48	0,16	0,15
Фаза (φ), рад	3,02	0,14	-1,39	1,13	3,37	0,41	0,97	2,90	1,13	4,40	2,07	0,62	4,65	3,79
Харасавэй														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	2,7	3,3	4,0	4,6	5,1	5,6	6,4	8,0	9,2	14,2	18,3	25,6
Амплитуда (A_j), °C	0,35	0,12	0,90	0,27	0,57	0,24	0,27	0,72	0,46	0,59	0,49	0,21	0,37	0,47
Фаза (φ), рад	3,44	0,37	-1,44	0,21	3,33	3,99	1,98	1,09	4,63	1,39	-0,50	-1,52	0,57	0,04
Марре-Сале														
Период (y_j), лет	2,1	3,7	4,0	4,6	5,6	6,1	7,1	8,0	21,3					
Амплитуда (A_j), °C	0, 46	0, 12	0, 60	0, 44	0, 91	0, 21	0, 38	0, 84	0, 08					
Фаза (φ), рад	3,16	2,81	3,19	4,20	1,15	-1,3	4,36	0,98	3,15					

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Дудинка														
Период (y_j), лет	2,2	2,4	2,7	3,6	4	4,6	5,6	6,4	8	10,7	21,3			
Амплитуда (A_j), °C	0,44	0,17	0,81	0,33	0,28	0,47	0,43	0,48	0,44	0,32	0,37			
Фаза (φ_j), рад	1,87	2,12	4,31	-1,33	3,43	4,27	0,83	-1,49	0,50	4,22	0,50			
Тазовское														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,7	3,4	3,5	3,8	4,6	5,3	6,4	8,0	10,7	12,8	16,0	
Амплитуда (A_j), °C	0,70	0,22	0,63	0,23	0,56	0,58	0,85	0,47	0,65	0,28	0,74	0,63	0,68	
Фаза (φ_j), рад	2,06	0,44	-1,29	0,47	1,00	-0,85	-1,22	0,60	1,46	0,80	1,56	2,63	3,59	
Игарка														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,5	2,7	3,2	3,6	4,3	4,9	5,8	7,1	9,2	16,0	21,3	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,44	0,29	0,18	0,70	0,08	0,37	0,12	0,61	0,71	0,03	0,62	0,49	0,37	0,73
Фаза (φ_j), рад	2,03	0,68	-1,53	4,60	2,02	4,70	-0,51	4,14	0,94	1,20	-0,61	-0,87	-1,01	0,12
Салехард														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,8	3,3	3,9	4,4	4,8	6,0	7,6	9,9	14,2	25,6	32,7	42,1
Амплитуда (A_j), °C	0,23	0,13	0,50	0,32	0,47	0,22	0,41	0,35	0,31	0,28	0,33	0,18	0,13	0,53
Фаза (φ_j), рад	2,30	-1,44	3,29	2,64	-0,01	2,10	2,61	3,14	2,99	-1,28	0,02	-0,11	-0,56	-0,32
Ныда														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	2,8	3,3	3,9	4,6	5,1	5,6	6,4	8,5	11,6	16,0	25,6	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,30	0,10	0,50	0,21	0,54	0,08	0,03	0,44	0,38	0,08	0,15	0,11	0,20	0,48
Фаза (φ_j), рад	2,15	3,60	3,30	2,74	-0,01	-1,34	4,43	0,88	4,15	0,95	-0,53	0,18	-0,18	0,68
Туруханск														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,7	3,2	3,6	4,3	5,6	6,4	7,6	8,5	9,9	12,8	21,4	42,7
Амплитуда (A_j), °C	0,35	0,04	0,25	0,03	0,49	0,25	0,34	0,25	0,27	0,18	0,51	0,29	0,37	0,46
Фаза (φ_j), рад	1,72	1,28	-1,20	2,17	3,96	1,64	1,49	3,41	0,27	0,26	-1,10	2,21	2,61	4,25

продолжение приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Надым														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	2,8	3,1	3,4	3,9	4,4	5,6	7,1	9,9	14,2	21,4	32,0	42,7
Амплитуда (A_j), °C	0,27	0,05	0,43	0,24	0,46	0,54	0,30	0,50	0,10	0,29	0,55	0,16	0,05	0,53
Фаза (φ_j), рад	2,01	-0,54	3,43	1,72	2,87	0,27	2,36	0,99	-1,39	-0,93	-0,46	1,99	2,67	4,19
Тарко-Сале														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,6	2,9	3,2	3,6	4,3	4,9	5,6	6,4	9,0	9,8	16,0	25,6
Амплитуда (A_j), °C	0,53	0,31	0,26	0,57	0,15	0,37	0,31	0,45	0,58	0,67	0,21	0,59	0,29	0,08
Фаза (φ_j), рад	3,02	1,44	4,56	4,61	4,49	-1,13	0,87	4,34	0,42	4,33	1,01	-0,92	4,39	1,30
Полуй														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	2,8	3,3	3,9	4,6	5,1	5,6	6,4	8,5	11,6	21,3	25,6	42,7
Амплитуда (A_j), °C	0,30	0,10	0,52	0,22	0,55	0,12	0,07	0,46	0,39	0,08	0,10	0,16	0,08	0,47
Фаза (φ_j), рад	2,25	3,60	3,29	2,63	0,04	-1,15	-1,31	0,91	4,18	0,64	-0,51	0,26	-1,06	4,01
Верхне-Имбатское														
Период (y_j), лет	2,2	2,5	3,4	4,3	4,9	5,6	6,8	7,6	8,5	9,9	12,8	18,3	25,6	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,10	0,25	0,19	0,39	0,41	0,41	0,02	0,02	0,13	0,38	0,20	0,43	0,13	0,57
Фаза (φ_j), рад	1,88	-1,29	1,84	1,69	4,16	0,92	0,53	-0,87	0,83	-0,78	-0,37	1,11	2,65	-0,34
Сургут														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8	3,1	3,4	3,8	4,3	4,8	5,6	6,0	32,0	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,37	0,13	0,13	0,10	0,23	0,08	0,17	0,34	0,29	0,33	0,50	0,10	0,03	0,37
Фаза (φ_j), рад	1,69	2,78	-1,04	-0,38	3,11	2,59	2,75	-0,22	1,65	2,85	0,59	2,27	4,00	0,10
Ханты-Мансийск														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	4,0	4,6	4,9	6,4	8,0	9,2	2,8	21,3	
Амплитуда (A_j), °C	0,35	0,44	0,11	0,44	0,10	0,41	0,58	0,09	0,34	0,39	0,23	0,26	0,30	
Фаза (φ_j), рад	3,04	1,13	2,99	3,51	3,05	3,36	4,56	0,06	4,42	2,01	-0,87	-0,13	1,38	

продолжение приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Саскылах														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,7	3,0	3,6	4,3	4,9	5,8	7,1	9,2	10,7	21,3	31,9	
Амплитуда (A_j), °C	0,16	0,29	0,7	0,39	0,33	0,04	0,47	0,48	0,51	0,63	0,28	0,24	0,12	
Фаза (φ_j), рад	1,88	-1,55	3,42	-2,29	6,56	-1,94	1,71	4,29	3,04	2,59	3,12	-0,78	-1,67	
Тикси														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,2	4,0	4,6	6,4	7,1	9,2	16,0					
Амплитуда (A_j), °C	0,24	0,65	0,24	0,44	0,42	0,25	0,40	0,44	0,3					
Фаза (φ_j), рад	0,77	4,38	0,54	2,17	4,21	3,63	0,65	-1,36	1,46					
Кюсюр (Булун)														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,7	3,0	3,4	4,0	4,6	5,3	6,4	8,0	9,2	16,0	21,3	31,9
Амплитуда (A_j), °C	0,18	0,20	0,84	0,43	0,26	0,54	0,41	0,43	0,09	0,25	0,42	0,53	0,19	0,41
Фаза (φ_j), рад	0,85	-0,13	4,47	1,13	3,81	2,01	-1,32	3,58	3,86	1,69	-1,55	1,69	2,07	2,07
Чокурдах														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,6	2,8	3,2	3,4	4,9	7,1	8,0	10,7	12,8	21,3		
Амплитуда (A_j), °C	0,29	0,39	0,21	0,22	0,63	0,36	0,57	0,33	0,51	0,61	0,58	0,68		
Фаза (φ_j), рад	1,42	-0,99	3,14	3,79	-0,9	2,08	3,36	0,62	1,18	2,36	-0,89	2,12		
Жилинда														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,2	4,3	4,9	5,8	7,1	8	10,7	21,3	31,9			
Амплитуда (A_j), °C	0,14	0,65	0,21	0,18	0,435	0,3	0,30	0,06	0,31	0,19	0,317			
Фаза (φ_j), рад	4,19	5,04	-0,70	2,07	5,86	3,09	1,20	4,43	3,59	-2,19	8,55			
Сиктях														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,7	3,0	3,4	4,0	4,6	5,3	5,8	6,4	8,0	9,2	16,0	31,9
Амплитуда (A_j), °C	0,14	0,20	0,73	0,35	0,14	0,62	0,55	0,63	0,32	0,21	0,18	0,34	0,34	0,41
Фаза (φ_j), рад	0,08	-0,50	4,49	1,74	3,54	2,16	-1,50	4,05	0,12	-0,39	0,71	-1,44	1,85	2,47

продолжение приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Саханджа														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,7	3,0	3,4	4,0	4,6	5,3	6,4	8,0	9,2	12,7	21,3	31,9
Амплитуда (A_j), °C	0,14	0,19	0,56	0,22	0,29	0,45	0,46	0,51	0,32	0,25	0,38	0,12	0,26	0,34
Фаза (φ_j), рад	-0,06	0,06	4,39	1,40	3,48	2,29	4,57	3,91	-0,84	0,42	4,66	0,27	2,68	2,44
Депутатский														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	3,4	4,1	4,6	5,3	6,1	7,1	8,5	12,8	16,0	25,6	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,16	0,25	0,35	0,14	0,36	0,34	0,14	0,21	0,29	0,27	0,11	0,16	0,13	0,51
Фаза (φ_j), рад	0,71	0,83	2,43	1,69	-1,54	4,30	4,42	0,80	2,98	1,59	1,45	1,67	4,01	0,91
Сухана														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,6	4,0	5,8	7,1	9,2	10,7	12,8					
Амплитуда (A_j), °C	0,16	0,76	0,55	0,62	0,497	0,37	0,51	0,32	0,38					
Фаза (φ_j), рад	3,92	4,50	-1,02	2,43	1,99	0,57	4,20	-0,52	2,42					
Оленек														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,5	4,6	5,3	6,4	7,1	8,5	10,7	12,8	16,0	21,3	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,08	0,17	0,28	0,45	0,41	0,12	0,26	0,31	0,22	0,30	0,12	0,15	0,25	0,58
Фаза (φ_j), рад	1,88	-1,32	2,64	-1,49	4,45	-1,30	1,18	2,93	2,02	1,86	2,09	-0,78	-1,25	1,24
Мянгкяра														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,6	3,0	4,1	5,3	6,8	8,0	9,9	12,8	18,3	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,09	0,06	0,11	0,20	0,19	0,37	0,14	0,16	0,23	0,41	0,12	0,32	0,17	0,39
Фаза (φ_j), рад	-0,77	4,51	0,70	0,36	2,63	-1,46	2,43	3,31	3,39	1,52	3,15	3,17	1,53	0,65
Маак														
Период (y_j), лет	2,1	2,6	3,4	4,6	5,3	5,8	7,1	8,5	9,9	12,8	20,1	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,10	0,03	0,33	0,48	0,36	0,32	0,25	0,21	0,09	0,32	0,07	0,24	0,17	0,49
Фаза (φ_j), рад	-0,56	4,11	2,89	4,44	-1,54	2,17	0,83	3,11	4,14	1,53	0,26	3,46	2,63	0,58

продолжение приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Верхоянск														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,8	4,7	7,1	8,5	1,7	12,8	16,0	25,6	64,1			
Амплитуда (A_j), °C	0,15	0,09	0,08	0,23	0,23	0,31	0,17	0,25	0,06	0,11	0,49			
Фаза (φ_j), рад	0,75	2,45	4,04	3,72	0,55	3,01	7,26	1,49	1,63	1,35	0,77			
Собопоп														
Период (y_j), лет	2,1	2,4	2,7	3,1	4,4	6,1	7,1	8,5	9,2	9,9	12,8	18,3	31,9	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,13	0,23	0,06	0,21	0,07	0,22	0,16	0,14	0,36	0,04	0,44	0,16	0,20	0,40
Фаза (φ_j), рад	0,92	0,76	3,03	1,71	0,16	4,11	0,66	2,75	4,19	-0,20	1,42	3,56	3,47	0,55
Ярольин														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	7,1	8,5	9,2	9,9	10,7	12,8	21,3	64,1				
Амплитуда (A_j), °C	0,18	0,11	0,29	0,04	0,59	0,54	0,58	0,41	0,10	0,55				
Фаза (φ_j), рад	0,55	1,91	1,04	2,46	4,59	0,55	0,82	1,26	1,94	0,49				
Жиганск														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	4,6	5,3	7,1	8,5	10,7	12,8	18,3	25,6	31,9	64,1		
Амплитуда (A_j), °C	0,12	0,10	0,39	0,33	0,16	0,41	0,13	0,31	0,14	0,10	0,21	0,42		
Фаза (φ_j), рад	1,01	4,31	4,44	4,50	0,28	2,92	1,29	1,72	4,24	1,04	3,48	0,53		
Шелагонцы														
Период (y_j), лет	2,1	2,6	3,0	3,7	4,6	5,3	7,1	9,9	12,8	16,0	18,3	25,6	64,1	
Амплитуда (A_j), °C	0,02	0,33	0,13	0,26	0,48	0,31	0,18	0,09	0,35	0,04	0,23	0,13	0,54	
Фаза (φ_j), рад	1,15	0,02	0,68	3,26	4,48	4,25	1,25	3,85	1,66	0,17	4,58	1,40	0,47	
Эйк														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,2	3,9	4,9	5,8	7,1	10,7	12,8	16,0	21,3	25,6	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,07	0,11	0,24	0,3	0,24	0,19	0,19	0,16	0,34	0,06	0,13	0,19	0,14	0,51
Фаза (φ_j), рад	-1,41	4,30	1,60	-0,91	4,41	1,83	0,82	1,66	1,33	4,00	-1,14	1,82	3,50	0,65

продолжение приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Зырянка														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	4,1	4,9	6,1	7,1	8,5	9,9	10,7	12,8	18,3	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,17	0,11	0,16	0,14	0,19	0,26	0,27	0,09	0,17	0,33	0,16	0,25	0,16	0,54
Фаза (φ_j), рад	0,08	0,88	1,17	3,63	4,02	0,91	4,20	3,32	1,82	2,53	11,5	17,37	18,42	5,54
Бестяхская Звероферма														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,0	4,6	6,8	7,1	8,5	9,2	9,9	12,8	18,3	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,14	0,12	0,21	0,36	0,13	0,33	0,21	0,05	0,11	0,26	0,04	0,07	0,12	0,28
Фаза (φ_j), рад	1,04	4,00	0,83	-1,41	2,74	-0,12	3,39	3,77	4,53	1,65	0,89	4,29	1,79	0,46
Сюрен-Кюель														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,4	4,1	5,3	5,8	7,1	8,0	9,2	10,7	14,2	16,0	25,6	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,15	0,17	0,34	0,25	0,20	0,25	0,25	0,16	0,14	0,09	0,34	0,16	0,07	0,32
Фаза (φ_j), рад	1,17	3,32	2,77	2,10	-0,94	1,05	-0,09	2,21	-1,00	0,98	0,45	-0,61	0,65	0,96
Чумпурук														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,0	4,6	6,4	7,1	8,5	9,2	9,9	12,8	18,3	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,05	0,19	0,14	0,35	0,11	0,32	0,20	0,08	0,15	0,26	0,06	0,27	0,39	0,15
Фаза (φ_j), рад	1,31	4,02	0,86	-1,53	3,75	-0,10	3,55	3,04	4,19	1,70	-1,12	3,11	1,23	-0,13
Сого-Хая (Усть-Виллой)														
Период (y_j), лет	2,2	2,7	3,9	4,6	5,8	6,4	7,1	9,2	9,9	12,8	16	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,19	0,17	0,18	0,32	0,26	0,12	0,22	0,11	0,01	0,32	0,04	0,07	0,04	0,29
Фаза (φ_j), рад	0,26	3,50	-1,17	-1,53	1,33	2,76	0,06	-1,06	2,14	1,47	1,30	4,41	1,20	0,76
Дарпир														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,7	2,9	3,3	4,3	5,1	5,8	6,8	7,6	9,2	11,6	14,3	31,9
Амплитуда (A_j), °C	0,20	0,25	0,11	0,52	0,32	0,17	0,23	0,03	0,25	0,05	0,46	0,23	0,18	0,08
Фаза (φ_j), рад	1,94	0,79	1,70	3,46	2,72	2,54	2,16	2,81	-1,14	3,64	-0,02	2,48	-0,78	3,28

продолжение приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Сеген-Кюель														
Период (y_j), лет	2,2	2,4	2,7	3,4	3,6	3,9	4,8	7,1	9,2	14,2	16,0	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,20	0,31	0,23	0,39	0,35	0,36	0,40	0,23	0,14	0,26	0,08	0,16	0,17	0,27
Фаза (φ_j), рад	1,23	1,04	3,91	2,84	-1,22	-0,68	2,27	-0,05	-0,72	0,21	-0,04	3,78	1,81	0,46
Хатырык-Хомо														
Период (y_j), лет	2,2	2,7	3,9	4,6	5,8	6,4	7,1	9,2	9,9	12,8	16,0	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,19	0,17	0,16	0,36	0,26	0,11	0,23	0,09	0,04	0,30	0,05	0,06	0,07	0,28
Фаза (φ_j), рад	0,15	3,20	-1,18	4,68	1,22	2,89	0,11	-1,51	4,37	1,48	1,49	4,10	1,02	0,75
Сангар														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,4	4,6	5,6	7,1	8,5	9,2	9,9	12,8	16,0	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,16	0,11	0,32	0,36	0,19	0,23	0,15	0,10	0,04	0,30	0,05	0,14	0,14	0,27
Фаза (φ_j), рад	0,37	1,56	1,44	-1,04	2,02	-0,03	4,14	-0,79	3,79	3,09	3,06	20,23	11,80	4,85
Делянكير														
Период (y_j), лет	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,2	3,5	4,0	5,1	6,8	9,9	11,6	21,4	25,6
Амплитуда (A_j), °C	0,28	0,13	0,26	0,13	0,54	0,28	0,20	0,26	0,05	0,38	0,39	0,54	0,76	0,88
Фаза (φ_j), рад	1,64	-1,57	1,09	1,72	3,53	0,35	-1,09	2,16	0,38	-1,21	0,10	2,68	-0,72	2,30
Оймякон														
Период (y_j), лет	2,1	2,6	2,9	4,9	6,8	9,2	11,6	12,8	21,3	64,0				
Амплитуда (A_j), °C	0,31	0,09	0,62	0,07	0,42	0,44	0,5	0,23	0,12	0,39				
Фаза (φ_j), рад	2,18	1,06	3,46	4,37	-1	-0,15	2,42	4,03	1,05	0,6				
Нюрба														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	2,9	3,1	3,6	4,4	5,8	6,4	7,1	9,9	12,8	25,6	31,0	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,08	0,32	0,23	0,06	0,29	0,11	0,27	0,11	0,29	0,09	0,22	0,18	0,18	0,50
Фаза (φ_j), рад	-1,09	4,06	3,54	1,05	-1,11	0,76	1,14	3,36	-0,09	4,56	1,44	1,08	4,03	0,24

продолжение приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Восточная														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,9	3,7	4,6	5,3	6,1	6,8	8,5	9,9	12,8	18,3	31,9	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,19	0,23	0,56	0,16	0,10	0,08	0,11	0,35	0,28	0,17	0,29	0,20	0,24	0,50
Фаза (φ_j), рад	1,83	0,38	3,75	-0,93	4,03	4,43	4,60	-1,16	3,58	-0,69	0,66	2,23	2,87	0,24
Сюльдюкар														
Период (y_j), лет	2,2	2,7	3,3	4,8	5,8	6,8	7,1	9,2	9,9	10,7	16,0	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,25	0,22	0,35	0,44	0,27	0,18	0,35	0,27	0,21	0,17	0,08	0,13	0,11	0,30
Фаза (φ_j), рад	0,42	3,97	2,24	2,14	0,99	4,31	0,50	4,62	-0,22	0,56	1,52	4,37	2,19	0,56
Западная														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,7	2,9	3,3	3,5	4,4	5,6	6,8	8,0	9,9	14,2		
Амплитуда (A_j), °C	0,18	0,26	0,22	0,41	0,26	0,28	0,06	0,01	0,56	0,25	0,15	0,21		
Фаза (φ_j), рад	1,97	-0,27	-0,75	3,64	3,34	-0,61	-1,49	0,85	4,66	1,33	-1,32	1,30		
Мирный														
Период (y_j), лет	2,7	4,8	5,6	7,1	8,1	10,7	12,8	16,0	21,3	31,9	42,7	64,1		
Амплитуда (A_j), °C	0,16	0,39	0,13	0,23	0,15	0,05	0,21	0,05	0,09	0,13	0,09	0,29		
Фаза (φ_j), рад	3,96	2,12	2,02	0,14	1,53	4,16	1,77	1,01	0,92	4,02	0,67	1,09		
Туой-Хая														
Период (y_j), лет	2,2	2,7	5,3	7,1	9,2	10,7	14,2	25,6	64,1					
Амплитуда (A_j), °C	0,22	0,12	0,13	0,21	0,17	0,07	0,35	0,04	0,29					
Фаза (φ_j), рад	0,49	3,58	-1,4	-0,1	-1,1	0,69	0,2	3,11	0,91					
Якутск														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	3,4	4,0	5,3	7,1	9,2	14,2	16,0	18,3	21,4	31,9	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,08	0,19	0,36	0,19	0,12	0,24	0,09	0,46	0,27	0,11	0,11	0,07	0,05	0,32
Фаза (φ_j), рад	1,02	3,31	2,75	3,13	-0,81	0,09	-0,82	0,45	-0,83	3,3	2,66	3,7	1,09	0,8

окончание приложения 1

Номер (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Усть-Мая														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	4,6	7,1	8,5	9,2	10,7	11,6	12,8	16,0	18,3	25,6		
Амплитуда (A_j), °C	0,21	0,15	0,31	0,04	0,2	0,09	0,09	0,27	0,46	0,14	0,28	0,15		
Фаза (φ_j), рад	1,53	3,09	-1,46	0,49	4,24	4,68	2,85	-0,82	0,41	3,73	1,72	0,88		
Комака														
Период (y_j), лет	2,2	2,7	3,6	4,8	6,1	6,8	7,1	9,2	9,9	11,6	18,3	21,3	42,7	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,24	0,19	0,18	0,40	0,23	0,08	0,30	0,15	0,08	0,11	0,17	0,16	0,04	0,31
Фаза (φ_j), рад	0,42	3,77	-1,48	2,05	3,79	3,36	0,06	-1,32	-0,50	0,33	0,14	1,61	2,40	0,72
Витим														
Период (y_j), лет	2,1	2,5	2,8	3,2	3,6	4,0	4,8	6,8	7,1	9,2	10,7	18,3	31,9	64,1
Амплитуда (A_j), °C	0,04	0,2	0,24	0,35	0,27	0,15	0,48	0,13	0,34	0,07	0,13	0,2	0,15	0,4
Фаза (φ_j), рад	-0,81	-1,02	3,69	2,67	-1,5	3,94	1,96	3,49	0,03	-1,28	0,04	0,69	-1,15	0,8
Чульман														
Период (y_j), лет	2,1	2,7	2,9	3,4	4,6	5,8	7,1	9,2	10,7	21,3	31,9			
Амплитуда (A_j), °C	0,39	0,39	0,43	0,18	0,42	0,53	0,15	0,35	0,28	0,55	0,35			
Фаза (φ_j), рад	3,15	1,04	0,25	4,34	0,49	3,52	3,83	2,38	1,53	5,19	0,31			

Приложение 2

Геологические, геокриологические и теплофизические характеристики пород, использованные при моделировании температурных полей пород в районе ряда метеостанций Европейского Севера России

Название породы	Интервал глубин, м	$H_{\text{МПП}}$, м;	T_0 , °C на h_0 , м;	Теплопроводность, Вт/м °C		Объемная теплоемкость, Вт ч/м³ °C		Q_f , Втч/м³
		q , Вт/м²	ξ , м	талой фазы	мерзлой фазы	талой фазы	мерзлой фазы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нарьян-Мар								
Песок	0 – 20	99,0;	-1,27 на 17,5;	2,26	2,62	696	626	25056
Суглинок	20 – 50			1,33	1,51	777	592	29696
Супесь	50 – 70			1,45	1,57	667	563	16704
Известняк	70 – 150	0,029	$\xi = 0,62$	2,90	3,20	626	615	3480
Воркута								
Суглинок средний гравелист.	0 – 6	72,5;	-1,4 на 15,0; $\xi = 0,9$	1,45	1,57	835	603	38976
Суглинок легкий	6 – 7	0,06		1,10	1,22	684	522	25984
Суглинок легкий	7 – 8			1,04	1,16	661	533	22388
Суглинок средний	8 – 9			1,45	1,57	835	603	38976
Супесь тяжелая	9 – 150			1,33	1,51	684	522	25984
Малые Кармакулы								
Суглинок	0 – 3	317,5;	-2,96 на 21,0;	1,62	1,86	853	585	23200
Известняк выветрел.	3 – 20			2,10	2,20	696	580	9280
Известняк плотный	20 – 500	0,02	$\xi = 1,30$	2,90	3,20	626	614	3480
Амдерма								
Суглинок легкий	0 – 5	224,7;	-4,18 на 25,0; $\xi = 0,15$	1,57	1,80	858	585	45936
Суглинок средний	5 – 70	0,029		1,57	1,68	928	649	35525
Известняк	70 – 500			2,90	3,13	626	614	3480
Канин Нос								
Суглинок	0 – 10	49,5;	-0,5 на 12,0; $\xi = 0,6$	1,51	1,69	872	651	45329
Песок	10 – 14	0,029		1,38	1,62	605	488	11165
Суглинок	14 – 22			1,51	1,69	872	651	45329
Песок	22 – 26			1,38	1,62	605	488	11165
Суглинок	26 – 110			1,51	1,69	872	651	45329

Условные обозначения к приложению 2:

$H_{\text{ммп}}$ – глубина залегания подошвы многолетнемерзлых грунтов, считая от дневной поверхности; q – плотность теплопотока; T_0 – среднегодовая температура грунта на глубине (h_0) нулевых годовых амплитуд;

ξ – максимальная глубина сезонного оттаивания грунта: для м.с. Канин Нос на 1 ноября, для остальных пунктов на 1 октября,

Q_f – теплота фазовых переходов

Приложение 3

Верхние граничные условия для моделирования теплового поля пород
в районе ряда метеостанций Европейского Севера России

Условные обозначения к приложению 3:

$T_{\text{до 1974}}$, $T_{1974-80}$, ..., $T_{1990-00}$ – среднегодовые значения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$):
до 1973 – за период метеонаблюдений до начала тренда,

1990-00 – за 1990-2000 гг (средние значения за 10 лет) с учетом тренда;

h_s , ρ_s , λ_s – мощность (м), плотность (г/см^3), коэффициент теплопроводности снежного покрова ($\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}$); h_p , λ_p – мощность (м) и коэффициент теплопроводности растительного покрова ($\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}$); α – коэффициент теплообмена (Вт/м^2 $^{\circ}\text{C}$): при отрицательной среднемесячной температуре воздуха $\alpha = 1/R_s$,

где $R_s = h_s/\lambda_s$; при положительной среднемесячной температуре воздуха $\alpha = 1/R_p$, где $R_p = h_p/\lambda_p$.

Нарьян-Мар

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
$T_{\text{до 1974}}$	-16,6	-17,0	-14,7	-6,6	-0,3	7,6	12,6	11,1	5,6	-1,3	-8,1	-13,9
Температура воздуха с учетом тренда												
$T_{1974-80}$	-16,1	-16,5	-14,2	-6,1	0,2	7,9	13,1	11,6	6,1	-0,8	-7,6	-13,4
$T_{1980-90}$	-17,2	-17,6	-15,3	-7,2	-0,9	6,8	12,0	10,5	5,0	-1,9	-8,7	-14,5
$T_{1990-00}$	-16,7	-17,1	-14,8	-6,7	-0,4	7,3	12,5	11,0	5,5	-1,4	-8,2	-14,0
$T_{2000-10}$	-16,6	-17,0	-14,7	-6,6	-0,3	7,4	12,6	11,1	5,6	-1,3	-8,1	-13,9
$T_{2010-20}$	-16,5	-16,9	-14,6	-6,5	-0,2	7,5	12,7	11,2	5,7	-1,2	-8,0	-13,8
$T_{2020-30}$	-16,7	-17,1	-14,8	-6,7	-0,4	7,3	12,5	11,0	5,5	-1,4	-8,2	-14,0
$T_{2030-40}$	-16,6	-17,0	-14,7	-6,6	-0,3	7,4	12,6	11,1	5,6	-1,3	-8,1	-13,9
$T_{2040-50}$	-16,0	-16,4	-14,1	-6,0	0,3	8,0	13,2	11,7	6,2	-0,7	-7,5	-13,3
$T_{2050-60}$	-16,8	-17,2	-14,9	-6,8	-0,5	7,2	12,4	10,9	5,4	-1,5	-8,3	-14,1
h_s	0,41	0,46	0,53	0,51	0,22	$h_p = 0,18$				0,09	0,22	0,33
ρ_s	0,25	0,28	0,29	0,31	0,21	-				0,11	0,20	0,24
λ_s	0,28	0,30	0,31	0,34	0,24	$\lambda_p = 0,23$				0,13	0,22	0,27
α	0,68	0,66	0,59	0,66	1,11	1,29	1,29	1,29	1,29	1,42	1,00	0,81

продолжение приложения 3

Воркута

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1970}	-19,4	-19,5	-17,5	-8,9	-2,4	6,3	12,3	10,0	3,8	-4,4	-12,9	-17,5
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₀₋₈₀	-19,8	-19,9	-17,9	-9,3	-2,8	-5,9	11,9	9,6	3,4	-4,8	-13,3	-17,9
T ₁₉₈₀₋₉₀	-19,6	-19,7	-17,7	-9,1	-2,6	6,1	12,1	9,8	3,6	-4,6	-13,1	-17,7
T ₁₉₉₀₋₀₀	-19,6	-19,7	-17,7	-9,1	-2,6	6,1	12,1	9,8	3,6	-4,6	-13,1	-17,7
T ₂₀₀₀₋₁₀	-19,3	-19,4	-17,4	-8,8	-2,3	6,4	12,4	10,1	3,9	-4,3	-12,8	-17,4
T ₂₀₁₀₋₂₀	-19,5	-19,6	-17,6	-9,0	-2,5	6,2	12,2	9,9	3,7	-4,5	-13,0	-17,6
T ₂₀₂₀₋₃₀	-19,4	-19,5	-17,5	-8,9	-2,4	6,3	12,3	10,0	3,8	-4,4	-12,9	-17,5
T ₂₀₃₀₋₄₀	-19,2	-19,3	-17,3	-8,7	-2,2	6,5	12,5	10,2	4,0	-4,2	-12,7	-17,3
T ₂₀₄₀₋₅₀	-19,0	-19,1	-17,1	-8,5	-2,0	6,7	12,7	10,4	4,2	-4,0	-12,5	-17,1
T ₂₀₅₀₋₆₀	-18,9	-19,0	-17,0	-8,4	-1,9	6,8	12,8	10,5	4,3	-3,9	-12,4	-17,0
h _s	0,35	0,41	0,45	0,40	0,18	h _p = 0,10				0,05	0,20	0,29
ρ _s	0,24	0,25	0,26	0,29	0,32	-				0,20	0,22	0,23
λ _s	0,27	0,28	0,28	0,31	0,35	λ _p = 0,47				0,22	0,24	0,26
α	0,70	0,70	0,58	0,81	1,98	4,65	4,65	4,65	4,65	4,42	1,28	0,81

продолжение приложения 3

Амдерма

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1968}	-17,2	-18,9	-17,9	-10,3	-4,2	1,8	6,7	7,1	3,4	-2,8	-9,1	-14,2
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₆₈₋₇₀	-19,6	-21,2	-20,2	-12,7	-6,6	-1,0	4,3	4,7	1,1	-5,1	-11,0	-16,6
T ₁₉₇₀₋₈₀	-17,9	-19,5	-18,5	-11,0	-4,9	1,1	6,0	6,4	2,8	-3,4	-9,8	-14,9
T ₁₉₈₀₋₉₀	-17,6	-19,2	-18,2	-10,7	-4,6	1,4	6,3	6,7	3,0	-3,2	-9,5	-14,6
T ₁₉₉₀₋₀₀	-17,8	-19,4	-18,4	-10,9	-4,8	1,2	6,1	6,5	2,9	-3,4	-9,7	-14,8
T ₂₀₀₀₋₁₀	-17,6	-19,3	-18,3	-10,8	-4,7	1,3	6,2	6,6	3,0	-3,2	-9,6	-14,7
T ₂₀₁₀₋₂₀	-17,4	-19,1	-18,1	-10,5	-4,4	1,6	6,5	6,9	3,2	-3,0	-9,3	-14,4
T ₂₀₂₀₋₃₀	-17,7	-19,4	-18,4	-10,9	-4,7	1,3	6,2	6,5	2,9	-3,3	-9,6	-14,8
T ₂₀₃₀₋₄₀	-17,6	-19,3	-18,3	-10,7	-4,6	1,4	6,3	6,7	3,0	-3,2	-9,5	-14,7
T ₂₀₄₀₋₅₀	-17,1	-18,8	-17,8	-10,3	-4,2	1,8	6,7	7,1	3,5	-2,7	-9,1	-14,2
T ₂₀₅₀₋₆₀	-17,4	-19,1	-18,1	-10,6	-4,4	1,6	6,5	6,8	3,2	-3,0	-9,3	-14,5
h _s	0,41	0,46	0,53	0,51	0,22	h _p = 0,18				0,09	0,22	0,33
ρ _s	0,25	0,28	0,29	0,31	0,21	-				0,11	0,20	0,24
λ _s	0,28	0,30	0,31	0,34	0,24	λ _p = 0,423				0,13	0,22	0,27
α	0,69	0,69	0,59	0,66	1,10	1,29	1,29	1,29	1,29	1,42	1,00	0,81

продолжение приложения 3

Малые Кармакулы

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1984}	-14,3	-14,9	-14,9	-10,3	-4,1	2,2	6,8	6,8	3,6	-2,3	-7,7	-11,6
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₈₄₋₉₀	-14,4	-15,0	-15,0	-10,4	-4,2	2,1	6,7	6,7	3,5	-2,4	-7,8	-11,7
T ₁₉₉₀₋₀₀	-14,0	-14,6	-14,6	-10,0	-3,8	2,5	7,1	7,1	3,9	-2,0	-7,4	-11,3
T ₂₀₀₀₋₁₀	-13,3	-13,9	-13,9	-9,3	-3,1	3,2	7,8	7,8	4,6	-1,3	-6,7	-10,6
T ₂₀₁₀₋₂₀	-14,0	-14,6	-14,6	-10,0	-3,8	2,5	7,1	7,1	3,9	-2,0	7,4	-11,3
T ₂₀₂₀₋₃₀	-15,3	-15,9	-15,9	-11,3	-5,1	1,2	5,8	5,8	2,6	-3,3	-8,7	-12,6
T ₂₀₃₀₋₄₀	-15,0	-15,6	-15,6	-11,0	-4,8	1,5	6,1	6,1	2,9	-3,0	-8,4	-12,3
T ₂₀₄₀₋₅₀	-14,9	-15,5	-15,5	-10,9	-4,7	1,6	6,2	6,2	3,0	-2,9	-8,3	-12,2
T ₂₀₅₀₋₆₀	-14,2	-14,8	-14,8	-10,2	-4,0	2,3	6,9	6,9	3,7	-2,2	-7,6	-11,5
h _s	0,24	0,29	0,40	0,42	0,23	-				0,06	0,07	0,40
ρ _s	0,31	0,31	0,30	0,32	0,27	-				0,32	0,32	0,30
λ _s	0,34	0,34	0,33	0,35	0,29	-				0,35	0,35	0,33
α	1,40	1,16	0,81	0,81	1,28	14,0	14,0	14,0	14,0	5,93	4,77	0,81

окончание приложения 3

Канин Нос

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1965}	-7,9	-9,4	-8,97	-4,5	-0,7	4,5	8,30	8,60	5,9	1,91	-1,72	-5,5
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₆₅₋₇₀	-8,8	-10,0	-9,96	-5,5	-1,6	3,5	7,35	7,65	4,94	0,93	-2,7	-6,4
T ₁₉₇₀₋₈₀	-8,0	-9,6	-9,16	-4,7	-0,8	4,3	8,14	8,45	5,74	1,72	-1,91	-5,6
T ₁₉₈₀₋₉₀	-7,9	-9,4	-8,98	-4,5	-0,7	4,5	8,32	8,63	5,92	1,90	-1,73	-5,5
T ₁₉₉₀₋₀₀	-8,0	-9,5	-9,10	-4,7	-0,8	4,4	8,20	8,50	5,80	1,78	-1,85	-5,6
T ₂₀₀₀₋₁₀	-7,8	-9,4	-8,94	-4,5	-0,6	4,5	8,36	8,66	5,96	1,94	-1,69	-5,4
T ₂₀₁₀₋₂₀	-7,6	-9,1	-8,69	-4,2	-0,4	4,8	8,62	8,92	6,21	2,20	-1,44	-5,2
T ₂₀₂₀₋₃₀	-7,8	-9,4	-8,94	-4,5	-0,6	4,5	8,36	8,66	5,96	1,94	-1,69	-5,4
T ₂₀₃₀₋₄₀	-8,3	-9,8	-9,39	-5,0	-1,1	4,1	7,91	8,21	5,51	1,49	-2,14	-5,9
T ₂₀₄₀₋₅₀	-7,7	-9,3	-8,85	-4,4	-0,5	4,6	8,45	8,76	6,05	2,03	-1,6	-5,3
T ₂₀₅₀₋₆₀	-7,8	-9,3	-8,92	-4,5	-0,6	4,5	8,38	8,68	5,98	1,96	-1,67	-5,4
h _s	0,24	0,27	0,33	0,26	0,24	h _p = 0,30					0,12	0,21
ρ _s	0,30	0,33	0,35	0,36	0,41	-					0,23	0,28
λ _s	0,32	0,35	0,38	0,39	0,44	λ _p = 0,41					0,25	0,30
α	1,35	1,31	1,14	1,48	1,82	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	2,11	1,45

Приложение 4

Геологические, геокриологические и теплофизические характеристики пород, использованные при моделировании температурных полей пород в районе ряда метеостанций Западной Сибири

Название породы	Интер- вал глубин, м	H _{МП} , м; q, Вт/м ²	T ₀ , °C на h ₀ , м; ξ, м	Теплопровод- ность, Вт/м °C		Объемная теп- лоемкость, Вт ч/м ³ °C		Q _f , Втч/м ³
				талой фазы	мерзлой фазы	талой фазы	мерзлой фазы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
о. Белый								
Песок	0 – 60	300,0; 0,064	-8,61 на 23,5; ξ =0,2	1,91	2,14	766	568	32550
Суглинок	60– 200			1,60	1,90	951	663	67380
Песок	200– 310			2,15	2,37	777	592	29760
Салехард								
Суглинок	0 – 5	175,1; 0,03	-2,02 на 14,5; ξ =0,78	1,57	1,66	928	650	45570
Песок	5 – 155			2,15	2,37	777	592	29760
Суглинок	155 – 165			1,68	1,86	969	684	44640
Песок	165 – 200			2,67	2,84	876	667	33480
Надым								
Торф	0 – 1.5	90,7; 0,05	-1,64 на 16,5; ξ=0,51	0,93	1,39	1044	754	55800
Песок	1,5 – 110			2,15	2,37	777	592	29760
Тарко-Сале								
Суглинок	0 – 25	42,0; 0,038	-0,51 на 14,5; ξ=0,93	1,57	1,66	928	650	45570
Песок	25 – 80			2,15	2,37	777	592	29760
Полуй								
Торф	0 – 1.0	50,0; 0,031	-0,56 на 15,5; ξ= 0,,58	0,81	1,33	1044	661	79050
Суглинок	1,0 – 21			1,68	1,86	967	684	71424
Супесь	21 – 101			1,57	1,80	876	667	33480
Туруханск								
Супесь	0 – 10	56,5; 0,05	-0,51 на 17,5; ξ=1,30	1,68	1,79	817	609	27840
Суглинок	10 – 70			1,56	1,68	928	649	45472
Марре-Сале								
Песок	0 – 10	250,0; 0,03	-6,8 на 12,5; ξ =1.2	2,26	2,62	600	540	23700
Суглинок	10 – 300			1,57	1,80	755	557	31600

Условные обозначения к приложению 4: $H_{\text{МП}}$ – глубина залегания подошвы многолетнемерзлых грунтов, считая от дневной поверхности; q – плотность теплопотока; T_0 – среднегодовая температура грунта на глубине (h_0) нулевых амплитуд; ξ – максимальная глубина сезонного оттаивания пород, на 1 октября, Q_f – теплота фазовых переходов

Приложение 5

Верхние граничные условия для моделирования теплового поля пород в районе ряда метеостанций Западной Сибири

Условные обозначения к приложению 5

$T_{\text{до 1976}}$, $T_{1976-80}$, ..., $T_{1980-90}$ – среднегодовые значения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$):

до 1976 – за период метеонаблюдений до начала тренда,
1990-00 – за 1990-2000 гг (средние значения за 10 лет) с учетом тренда;

h_s , ρ_s , λ_s – мощность (м), плотность (г/см^3), коэффициент теплопроводности снежного покрова ($\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}$);

h_p , λ_p – мощность (м) и коэффициент теплопроводности растительного покрова ($\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}$);

α – коэффициент теплообмена ($\text{Вт/м}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$):

при отрицательной среднемесячной температуре воздуха

$$\alpha = 1/R_s, \text{ где } R_s = h_s/\lambda_s;$$

при положительной среднемесячной температуре воздуха

$$\alpha = 1/R_p, \text{ где } R_p = h_p/\lambda_p.$$

о. Белый

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
$T_{\text{до 1976}}$	-23,1	-24,3	-23,2	-15,7	-7,7	-0,5	4,0	4,9	1,7	-5,6	-14,4	-18,8
Температура воздуха с учетом тренда												
$T_{1976-80}$	-22,8	-24,0	-22,9	-15,4	-7,4	-0,2	4,3	5,2	2,0	-5,3	-14,1	-18,5
$T_{1980-90}$	-23,6	-24,8	-23,7	-16,2	-8,2	-1,0	3,5	4,5	1,3	-6,0	-14,9	-19,3
$T_{1990-00}$	-23,5	-24,7	-23,6	-16,0	-8,1	-0,9	3,6	4,6	1,4	-5,9	-14,8	-19,2
$T_{2000-10}$	-23,5	-24,7	-23,6	-16,1	-8,1	-0,9	3,6	4,6	1,4	-5,9	-14,8	-19,2
$T_{2010-20}$	-23,2	-24,4	-23,3	-15,8	-7,8	-0,6	3,9	4,8	1,6	-5,7	-14,5	-18,9
$T_{2020-30}$	-23,0	-24,2	-23,1	-15,6	-7,6	-0,4	4,1	5,1	1,9	-5,5	-14,3	-18,7
$T_{2030-40}$	-22,9	-24,0	-23,0	-15,4	-7,4	-0,2	4,2	5,2	2,0	-5,3	-14,2	-18,6
$T_{2040-50}$	-23,4	-24,5	-23,5	-15,9	-7,9	-0,7	3,7	4,7	1,5	-5,8	-14,6	-19,0
$T_{2050-60}$	-23,2	-24,3	-23,3	-15,7	-7,7	-0,5	3,9	4,9	1,7	-5,6	-14,4	-18,8
h_s	0,21	0,32	0,34	0,42	0,42	0,28	$h_p = 0,10$			0,09	0,15	0,20
ρ_s	0,31	0,31	0,32	0,36	0,38	0,40	-			0,18	0,24	0,30
λ_s	0,34	0,34	0,35	0,38	0,41	0,43	$\lambda_p = 0,35$			0,20	0,27	0,33
α	1,60	1,06	1,02	0,92	0,97	1,54	3,49	3,49	3,49	2,20	1,78	1,63

продолжение приложения 5

Салехард

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1979}	-23,9	-22,7	-18,0	-9,2	-1,7	7,8	14,0	11,3	5,3	-4,2	-15,1	-21,3
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₉₋₈₀	-23,6	-22,5	-17,7	-8,9	-1,5	8,1	14,3	11,6	5,6	-3,9	-14,8	-21,0
T ₁₉₈₀₋₉₀	-23,3	-22,2	-17,4	-8,6	-1,2	8,4	14,6	11,9	5,9	-3,6	-14,5	-20,8
T ₁₉₉₀₋₀₀	-23,2	-22,0	-17,3	-8,5	-1,0	8,5	14,7	12,0	6,0	-3,5	-14,4	-20,6
T ₂₀₀₀₋₁₀	-22,8	-21,7	-16,9	-8,1	-0,7	8,9	15,1	12,4	6,4	-3,1	-14,0	-20,2
T ₂₀₁₀₋₂₀	-23,6	-22,4	-17,7	-8,9	-1,4	8,1	14,3	11,7	5,6	-3,9	-14,8	-21,0
T ₂₀₂₀₋₃₀	-22,6	-21,4	-16,7	-7,9	-0,4	9,1	15,3	12,6	6,6	-2,9	-13,8	-20,0
T ₂₀₃₀₋₄₀	-21,9	-20,7	-16,0	-7,2	0,3	9,8	16,0	13,3	7,3	-2,2	-13,1	-19,3
T ₂₀₄₀₋₅₀	-22,4	-21,2	-16,5	-7,7	-0,2	9,3	15,5	12,8	6,8	-2,7	-13,6	-19,8
T ₂₀₅₀₋₆₀	-22,6	-21,4	-16,7	-7,9	-0,4	9,1	15,3	12,6	6,6	-2,9	-13,8	-20,0
h _s	039	0,44	0,49	0,5	0,54	h _p = 0,20				0,08	0,19	0,33
ρ _s	0,25	0,26	0,26	0,2	0,32	-				0,18	0,20	0,22
λ _s	0,27	0,28	0,28	0,30	0,35	λ _p = 0,53				0,20	0,22	0,24
α	0,69	0,63	0,57	0,56	0,65	2,67	2,67	2,67	2,67	2,56	1,16	0,73

продолжение приложения 5

Надым

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1972}	-23,7	-24,0	-17,0	-9,8	-1,0	8,7	15,8	11,2	5,4	-5,4	-15,0	-23,0
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₂₋₈₀	-23,2	-23,4	-16,5	-9,3	-0,5	9,2	16,4	11,7	5,9	-4,9	-14,5	-22,5
T ₁₉₈₀₋₉₀	-22,4	-22,6	-15,7	-8,5	0,3	10,1	17,2	12,5	6,7	-4,1	-13,7	-21,7
T ₁₉₉₀₋₀₀	-22,5	-22,7	-15,8	-8,6	0,2	10,0	17,1	12,4	6,6	-4,2	-13,8	-21,8
T ₂₀₀₀₋₁₀	-22,5	-22,8	-15,8	-8,6	0,2	9,9	17,0	12,4	6,6	-4,2	-13,8	-21,8
T ₂₀₁₀₋₂₀	-22,8	-23,1	-16,1	-8,9	-0,1	9,6	16,7	12,0	6,3	-4,6	-14,1	-22,1
T ₂₀₂₀₋₃₀	-21,9	-22,1	-15,2	-8,0	0,8	10,6	17,7	13,0	7,2	-3,6	-13,2	-21,2
T ₂₀₃₀₋₄₀	-21,2	-21,5	-14,5	-7,3	1,5	11,2	18,3	13,7	7,9	-2,9	-12,5	-20,5
T ₂₀₄₀₋₅₀	-22,0	-22,3	-15,3	-8,1	0,7	10,4	17,5	12,9	7,1	-3,7	-13,3	-21,3
T ₂₀₅₀₋₆₀	-22,1	-22,4	-15,5	-8,3	0,53	10,3	17,4	12,7	6,9	-3,9	-13,5	-21,4
h _s	0,46	0,60	0,66	0,66	0,47	h _p = 0,20				0,07	0,24	0,40
ρ _s	0,20	0,22	0,24	0,26	0,30	-				0,12	0,18	0,19
λ _s	0,22	0,24	0,27	0,28	0,33	λ _p = 0,35				0,14	0,20	0,21
α	0,48	0,41	0,41	0,43	0,69	1,74	1,74	1,74	1,74	2,04	0,83	0,52

продолжение приложения 5

Тарко-Сале

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1975}	-25,0	-24,2	-18,0	-8,1	-0,8	9,8	15,8	12,2	5,9	-4,7	-17,4	-23,1
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₅₋₈₀	-24,4	-23,6	-17,4	-7,5	-0,2	10,4	16,4	12,7	6,5	-4,1	-16,8	-22,5
T ₁₉₈₀₋₉₀	-24,5	-23,6	-17,5	-7,6	-0,2	10,3	16,3	12,7	6,4	-4,2	-16,9	-22,6
T ₁₉₉₀₋₀₀	-24,3	-23,4	-17,3	-7,4	-0,05	10,5	16,5	12,9	6,6	-4,0	-16,7	-22,4
T ₂₀₀₀₋₁₀	-23,9	-23,0	-16,9	-7,0	0,4	10,9	16,9	13,3	7,0	-3,6	-16,3	-22,0
T ₂₀₁₀₋₂₀	-23,8	-22,9	-16,8	-6,9	0,5	11,0	17,0	13,4	7,1	-3,5	-16,2	-21,9
T ₂₀₂₀₋₃₀	-23,4	-22,5	-16,4	-6,5	0,9	11,4	17,4	13,8	7,5	-3,1	-15,8	-21,5
T ₂₀₃₀₋₄₀	-23,1	-22,3	-16,2	-6,2	1,1	11,6	17,6	14,0	7,7	-2,9	-15,6	-21,3
T ₂₀₄₀₋₅₀	-22,9	-22,1	-15,9	-6,0	1,3	11,9	17,9	14,3	8,0	-2,6	-15,3	-21,0
T ₂₀₅₀₋₆₀	-22,4	-21,6	-15,6	-5,6	1,8	12,3	18,3	14,7	8,4	-2,2	-14,9	-20,6
T ₂₀₆₀₋₇₀	-22,5	-21,7	-15,6	-5,6	1,7	12,2	18,2	14,6	8,3	-2,3	-15,0	-20,7
h _s	0,35	0,45	0,53	0,49	0,22	h _p = 0,25				0,08	0,19	0,28
ρ _s	0,19	0,20	0,21	0,23	0,28					0,13	0,19	0,19
λ _s	0,21	0,22	0,23	0,26	0,30	λ _p = 0,66				0,15	0,21	0,21
α	0,59	0,49	0,44	0,52	1,40	2,63	2,63	2,63	2,63	1,90	1,10	0,74

продолжение приложения 5

Полуй

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1971}	-23,3	-22,8	-16,6	-7,7	-0,5	8,8	15,2	10,9	5,1	-4,6	-16,4	-21,2
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₁₋₈₀	-23,5	-22,9	-16,7	-7,8	-0,6	8,7	15,1	10,8	5,0	-4,7	-16,5	-21,3
T ₁₉₈₀₋₉₀	-22,3	-21,7	-15,5	-6,6	0,6	9,9	16,3	12,0	6,2	-3,5	-15,3	-20,1
T ₁₉₉₀₋₀₀	-22,8	-22,3	-16,1	-7,2	0,01	9,3	15,7	11,5	5,7	-4,1	-15,9	-20,7
T ₂₀₀₀₋₁₀	-22,7	-22,2	-16,0	-7,1	0,1	9,4	15,8	11,6	5,7	-4,0	-15,8	-20,6
T ₂₀₁₀₋₂₀	-23,1	-22,6	-16,4	-7,5	-0,3	9,0	15,4	11,2	5,3	-4,4	-16,2	-20,1
T ₂₀₂₀₋₃₀	-22,1	-21,6	-15,4	-6,5	0,7	10,0	16,4	12,2	6,4	-3,4	-15,2	-19,9
T ₂₀₃₀₋₄₀	-21,8	-21,3	-15,1	-6,2	1,0	10,3	16,7	12,5	6,7	-3,1	-14,8	-19,7
T ₂₀₄₀₋₅₀	-22,4	-21,8	-15,6	-6,7	0,5	9,8	16,2	11,9	6,1	-3,7	-15,4	-20,2
T ₂₀₅₀₋₆₀	-22,3	-21,8	-15,6	-6,7	0,5	9,8	16,2	12,0	6,1	-3,6	-15,3	-20,1
h _s	0,42	0,47	0,52	0,57	0,57	h _p = 0,15				0,08	0,19	0,33
ρ _s	0,25	0,26	0,26	0,28	0,32	-				0,18	0,20	0,22
λ _s	0,27	0,28	0,28	0,30	0,35	λ _p = 0,61				0,20	0,22	0,24
α	0,64	0,59	0,53	0,53	0,62	4,07	4,07	4,07	4,07	2,56	1,16	0,73

продолжение приложения 5

Туруханск

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегодовое значение температуры воздуха до рубежного года												
T _{до 1961}	-26,9	-23,5	-16,6	-8,4	0,2	9,9	16,2	12,7	5,7	-5,5	-19,4	-25,7
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₆₁₋₇₀	-27,0	-23,6	-16,7	-8,5	0,1	9,8	16,1	12,6	5,6	-5,6	-19,5	-25,8
T ₁₉₇₀₋₈₀	-27,6	-24,2	-17,3	-9,1	-0,5	9,2	15,5	12,0	5,0	-6,2	-20,1	-26,4
T ₁₉₈₀₋₉₀	-26,5	-23,1	-16,2	-8,0	0,6	10,3	16,6	13,1	6,1	-5,1	-19,0	-25,3
T ₁₉₉₀₋₀₀	-26,4	-23,0	-16,1	-7,9	0,7	10,4	16,7	13,2	6,2	-5,0	-18,9	-25,2
T ₂₀₀₀₋₁₀	-26,7	-23,3	-16,4	-8,2	0,4	10,1	16,4	12,9	5,9	-5,3	-19,2	-25,5
T ₂₀₁₀₋₂₀	-26,4	-23,0	-16,1	-7,9	0,7	10,4	16,7	13,2	6,2	-5,0	-18,9	-25,2
T ₂₀₂₀₋₃₀	-25,8	-22,4	-15,5	-7,3	1,3	11,0	17,3	13,8	6,8	-4,4	-18,3	-24,6
T ₂₀₃₀₋₄₀	-26,1	-22,7	-15,8	-7,6	1,0	10,7	17,0	13,5	6,5	-4,7	-18,6	-24,9
T ₂₀₄₀₋₅₀	-25,6	-22,2	-15,1	-7,1	1,5	11,2	17,5	14,0	7,0	-4,2	-18,1	-24,4
T ₂₀₅₀₋₆₀	-24,9	-21,5	-14,6	-6,4	2,2	11,9	18,2	14,7	7,7	-3,5	-17,4	-23,7
h _s	0,55	0,60	0,65	0,55	0,15	h _p = 0,15				0,08	0,19	0,33
ρ _s	0,20	0,22	0,24	0,20	0,30	-				0,10	0,30	0,45
λ _s	0,22	0,23	0,26	0,26	0,33	λ _p = 0,29				0,14	0,20	0,21
α	0,47	0,47	0,47	0,47	2,21	1,98	1,98	1,98	1,98	1,51	0,70	0,47

окончание приложения 5

Марре-Сале

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегодовое значение температуры воздуха до рубежного года												
T _{до 1971}	-21,8	-21,4	-20,3	-13	-5,5	1,2	6,6	6,7	3,2	-4,0	-13,1	-18,4
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₁₋₈₀	-23,0	-22,6	-21,5	-14,2	-6,7	-0,0	5,3	5,4	1,9	-5,2	-14,3	-19,6
T ₁₉₈₀₋₉₀	-21,7	-21,3	-20,2	-12,9	-5,4	1,2	6,6	6,7	3,2	-3,9	-13,0	-18,3
T ₁₉₉₀₋₀₀	-20,3	-19,9	-18,8	-11,5	-4,0	2,6	8,0	8,1	4,6	-2,5	-11,6	-16,9
T ₂₀₀₀₋₁₀	-21,5	-21,1	-20,0	-12,7	-5,2	1,4	6,8	6,9	3,4	-3,7	-12,8	-18,1
T ₂₀₁₀₋₂₀	-22,6	-22,2	-21,1	-13,8	-6,3	0,4	5,8	5,9	2,4	-4,8	-13,9	-19,2
T ₂₀₂₀₋₃₀	-22,7	-22,3	-21,2	-13,9	-6,4	0,2	5,6	5,7	2,2	-4,9	-14,0	-19,3
T ₂₀₃₀₋₄₀	-20,1	-19,7	-18,6	-11,3	-3,8	2,8	8,2	8,3	4,8	-2,3	-11,4	-16,7
T ₂₀₄₀₋₅₀	-19,9	-19,5	-18,4	-11,1	-3,6	3,0	8,4	8,5	5,0	-2,1	-11,2	-16,5
T ₂₀₅₀₋₆₀	-21,6	-21,2	-20,1	-12,8	-5,3	1,3	6,7	6,8	3,3	-3,8	-12,9	-18,2
h _s	0,14	0,16	0,18	0,21	0,18	0,06	h _p = 0,10			0,04	0,10	0,14
ρ _s	0,30	0,31	0,30	0,33	0,32	0,32	-			0,17	0,28	0,29
λ _s	0,32	0,33	0,32	0,35	0,34	0,34	λ _p = 0,35			0,19	0,30	0,31
α	2,32	2,09	1,80	1,69	1,92	5,75	3,49	3,49	3,49	4,82	3,04	2,25

Приложение 6

Геологические, геокриологические и теплофизические характеристики пород, использованные при моделировании температурных полей пород в районе ряда метеостанций Средней и Восточной Сибири

Название породы	Интервал глубин, м	H _{МПП} , м; q, Вт/м ²	T ₀ , °C на h ₀ , м; ξ, м	Теплопроводность, Вт/м °C		Объемная теплоемкость, Вт ч/м ³ °C		Q _f , Втч/м ³
				талой фазы	мерзлой фазы	талой фазы	мерзлой фазы	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тикси								
Суглинки	0-2	705,5; 0,04	-10,7 на 10; 0,45	1,00	1,60	600	400	40000
Переслаивание песка и гравийно-галечникового грунта	2-40			1,30	1,90	550	430	43000
Песчаник	40-800			2,00	2,50	660	640	5040
Якутск								
Песок	0-50	300,0; 0,06	-3,0 на 10; 2,2	2,15	2,38	777	592	32000
Песчаник	50-400			2,96	4,00	467	400	9700
Чульман								
Песок	0-5	130,0;	-2,1 на 8,25;1,7	1,50	1,70	600	800	24000
Песчаник	5-150	0,06		1,70	1,90	560	600	3200
Туой-Хая								
Песок	0-10	220,0; 0,04	-2,8 на 10,5; 1,7	1,74	2,83	690	500	29760
Суглинки	10-100			1,16	2,15	900	600	54690
Известняк	100-250			4,30	5,00	670	630	7120
Мирный								
Песок заиленный	0-15	302,0;	-3,4 на 11,0; 1,8	1,56	2,44	620	460	25950
Песок с прослоями глины	15-25	0,04		1,65	2,13	770	520	39680
Супесь, глины	25-100			1,2	1,92	660	520	27900
Известняк	100-310			4,3	5	670	630	7120
Витим								
Песок	0-5	90,0; 0,03	-1,8 на 10,0; 2,0	1,50	2,20	650	480	23780
Супесь, суглинки, глины	5-20			1,32	1,84	700	590	42560
Известняк	20-150			4,30	5,00	670	630	7120

окончание приложения 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Усть-Мая								
Супесь	0-3	187,0; 0,04	-4,0 на 9,5; 1,6	1,35	1,91	790	655	36300
Суглинки	3-30			1,35	2,36	840	575	46400
Песок	30-60			1,65	3,13	770	520	39500
Песчаник	60-200			2,86	3,82	465	400	10000
Чокурдах								
Супесь	0-10	500,0; 0,05	-11,1 на 11,0; 0,7	1,12	2,00	700	530	36200
Переслаивание песка и гравийно-галечникового грунта	10-30			1,31	1,80	570	480	40000
Известняк	30-500			4,18	4,81	650	620	7900
Верхоянск								
Песок	0-3	303,5; 0,06	-7,30 на 13; 1,4	1,43	1,80	520	410	18750
Гравийно-галечниковый материал с песчаным заполнителем	3-15			2,56	3,41	640	570	12500
Известняк	15-320			3,20	3,80	660	615	7000
Оймякон								
Песок	0-5	502,2; 0,06	-6,8 на 11,0; 1,5	1,57	2,21	577	436	22780
Супесь	50-20			1,02	1,63	590	478	23760
Песчаник	20-550			1,81	2,00	700	670	6700
Саскылах								
Супесь	0-3	694,0; 0,04	-8,3 на 10,0 0,8	1,00	1,51	540	450	19830
Суглинки	3-30			1,40	1,90	800	660	29200
Песчаник	30-780			1,95	2,38	670	650	5500

Условные обозначения к приложению 6

$H_{\text{мп}}$ – глубина залегания подошвы многолетнемерзлых грунтов, считая от дневной поверхности;

q – плотность теплопотока;

T_0 – среднегодовая температура грунта на глубине (h_0) нулевых годовых амплитуд;

ξ – максимальная глубина сезонного оттаивания грунта, на 1 октября.

Q_f – теплота фазового перехода

Приложение 7

Верхние граничные условия для моделирования теплового поля пород в районе ряда метеостанций Средней и Восточной Сибири

Тикси

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1981}	-31,7	-30,9	-26,2	-18,0	-6,7	2,7	7,2	7,5	1,7	-10,6	-23,6	-28,6
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₈₁₋₉₀	-30,6	-29,8	-25,1	-16,9	-5,6	3,8	8,3	8,6	2,8	-9,5	-22,5	-27,5
T ₁₉₉₀₋₀₀	-30,2	-29,4	-24,7	-16,5	-5,2	4,2	8,7	9,0	3,2	-9,1	-22,1	-27,1
T ₂₀₀₀₋₁₀	-30,2	-29,4	-24,7	-16,5	-5,2	4,2	8,7	9,0	3,2	-9,1	-22,1	-27,1
T ₂₀₁₀₋₂₀	-30,1	-29,3	-24,6	-16,4	-5,1	4,3	8,8	9,1	3,3	-9,0	-22,0	-27,0
T ₂₀₂₀₋₃₀	-30,1	-29,3	-24,6	-16,4	-5,1	4,3	8,8	9,1	3,3	-9,0	-22,0	-27,0
T ₂₀₃₀₋₄₀	-30,1	-29,3	-24,6	-16,4	-5,1	4,3	8,8	9,1	3,3	-9,0	-22,0	-27,0
T ₂₀₄₀₋₅₀	-30,2	-29,4	-24,7	-16,5	-5,2	4,2	8,7	9,0	3,2	-9,1	-22,1	-27,1
T ₂₀₅₀₋₆₀	-30,5	-29,7	-25,0	-16,8	-5,5	3,9	8,4	8,7	2,9	-9,4	-22,4	-27,4
h _s	0,19	0,21	0,24	0,29	0,30	h _p = 0,05				0,10	0,14	0,17
ρ _s	0,29	0,30	0,32	0,33	0,34	-				0,20	0,23	0,26
λ _s	0,31	0,32	0,34	0,35	0,36	λ _p = 0,23				0,22	0,25	0,28
α	1,65	1,55	1,44	1,22	1,22	4,6	4,6	4,6	4,6	2,23	1,81	1,67

Условные обозначения к приложению 7

T_{до 1980}, T₁₉₈₁₋₉₀, ..., T₁₉₉₀₋₀₀ – среднегодовые значения температуры воздуха (°C):

до 1980 – за период метеонаблюдений до начала тренда,

1990-00 – за 1990-2000 гг. (средние значения за 10 лет)

с учетом тренда;

h_s, ρ_s, λ_s – мощность (м), плотность (г/см³), коэффициент теплопроводности снежного покрова (Вт/м °C);

h_p, λ_p – мощность (м) и коэффициент теплопроводности растительного покрова (Вт/м °C);

α – коэффициент теплообмена (Вт/м² °C):

при отрицательной среднемесячной температуре воздуха

$$\alpha = 1/R_s, \text{ где } R_s = h_s/\lambda_s;$$

при положительной среднемесячной температуре воздуха

$$\alpha = 1/R_p, \text{ где } R_p = h_p/\lambda_p.$$

продолжение приложения 7

Якутск

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегодовья температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1977}	-41,3	-35,2	-22,3	-5,9	6,2	15,2	18,8	15,3	5,7	-9,3	-31,9	-38,7
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₇₋₈₀	-41,9	-35,8	-22,9	-6,5	5,6	14,6	18,2	14,7	5,1	-9,9	-32,5	-39,3
T ₁₉₈₀₋₉₀	-39,3	-33,2	-20,3	-3,9	8,2	17,2	20,8	17,3	7,7	-7,3	-29,9	-36,7
T ₁₉₉₀₋₀₀	-39,7	-33,6	-20,7	-4,3	7,8	16,8	20,4	16,9	7,3	-7,7	-30,3	-37,1
T ₂₀₀₀₋₁₀	-38,8	-32,7	-19,8	-3,4	8,7	17,7	21,3	17,8	8,2	-6,8	-29,4	-36,2
T ₂₀₁₀₋₂₀	-38,2	-32,1	-19,2	-2,8	9,3	18,3	21,9	18,4	8,8	-6,2	-28,8	-35,6
T ₂₀₂₀₋₃₀	-38,1	-32,0	-19,1	-2,7	9,4	18,4	22,0	18,5	8,9	-6,1	-28,7	-35,5
T ₂₀₃₀₋₄₀	-37,0	-30,9	-18,0	-1,6	10,5	19,5	23,1	19,6	10,0	-5,0	-27,6	-34,4
T ₂₀₄₀₋₅₀	-35,9	-29,8	-16,9	-0,5	11,6	20,6	24,2	20,7	11,1	-3,9	-26,5	-33,3
T ₂₀₅₀₋₆₀	-35,2	-29,1	-16,2	0,2	12,3	21,3	24,9	21,4	11,8	-3,2	-25,8	-32,6
h _s	0,20	0,22	0,25	0,28	0,30	h _p = 0,10				0,12	0,14	0,18
ρ _s	0,18	0,20	0,24	0,27	0,28					0,11	0,15	0,17
λ _s	0,20	0,22	0,26	0,29	0,30	λ _p = 0,23				0,13	0,17	0,19
α	1,02	1,01	1,06	1,05	1,01	2,3	2,3	2,3	2,3	1,10	1,23	1,07

продолжение приложения 7

Чульман

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегодовья температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1964}	-36,0	-31,0	-20,2	-7,1	3,8	12,5	15,9	12,4	4,4	-7,7	-24,1	-33,6
Температура воздуха с учетом тренда												
T _{до 1964-70}	-35,7	-30,7	-19,9	-6,8	4,1	12,8	16,2	12,7	4,7	-7,4	-23,8	-33,3
T ₁₉₇₀₋₈₀	-35,2	-30,2	-19,4	-6,3	4,6	13,3	16,7	13,2	5,2	-6,9	-23,3	-32,8
T ₁₉₈₀₋₉₀	-34,7	-29,7	-18,9	-5,8	5,1	13,8	17,2	13,7	5,7	-6,4	-22,8	-32,3
T ₁₉₉₀₋₀₀	-33,6	-28,6	-17,8	-4,7	6,2	14,9	18,3	14,8	6,8	-5,3	-21,7	-31,2
T ₂₀₀₀₋₁₀	-32,2	-27,2	-16,4	-3,3	7,6	16,3	19,7	16,2	8,2	-3,9	-20,3	-29,8
T ₂₀₁₀₋₂₀	-31,7	-26,7	-15,9	-2,8	8,1	16,8	20,2	16,7	8,7	-3,4	-19,8	-29,3
T ₂₀₂₀₋₃₀	-30,8	-25,8	-15,0	-1,9	9,0	17,7	21,1	17,6	9,6	-2,5	-18,9	-28,4
T ₂₀₃₀₋₄₀	-30,6	-25,6	-14,8	-1,7	9,2	17,9	21,3	17,8	9,8	-2,3	-18,7	-28,2
T ₂₀₄₀₋₅₀	-29,5	-24,5	-13,7	-0,6	10,3	19,0	22,4	18,9	10,9	-1,2	-17,6	-27,1
T ₂₀₅₀₋₆₀	-28,0	-23,0	-12,2	0,9	11,8	20,5	23,9	20,4	12,4	0,3	-16,1	-25,6
h _s	0,22	0,24	0,28	0,34	h _p = 0,10							
ρ _s	0,26	0,27	0,28	0,28	-							
λ _s	0,28	0,29	0,30	0,30	λ _p = 0,29							
α	1,29	1,23	1,09	0,89	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	1,31	1,13	1,06

Туой-Хая

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегоголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1964}	-33,9	-28,8	-18,9	-6,9	4,0	13,4	16,1	12,2	4,7	-6,8	-23,2	-31,8
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₆₄₋₇₀	-33,8	-28,7	-18,8	-6,8	4,1	13,5	16,2	12,3	4,8	-6,7	-23,1	-31,7
T ₁₉₇₀₋₈₀	-33,3	-28,2	-18,3	-6,3	4,6	14,0	16,7	12,8	5,3	-6,2	-22,6	-31,2
T ₁₉₈₀₋₉₀	-32,8	-27,7	-17,8	-5,8	5,1	14,5	17,2	13,3	5,8	-5,7	-22,1	-30,7
T ₁₉₉₀₋₀₀	-32,3	-27,2	-17,3	-5,3	5,6	15,0	17,7	13,8	6,3	-5,2	-21,6	-30,2
T ₂₀₀₀₋₁₀	-32,0	-26,9	-17,0	-5,0	5,9	15,3	18,0	14,1	6,6	-4,9	-21,3	-29,9
T ₂₀₁₀₋₂₀	-32,1	-27,0	-17,1	-5,1	5,8	15,2	17,9	14,0	6,5	-5,0	-21,4	-30,0
T ₂₀₂₀₋₃₀	-32,0	-26,9	-17,0	-5,0	5,9	15,3	18,0	14,1	6,6	-4,9	-21,3	-29,9
T ₂₀₃₀₋₄₀	-31,4	-26,3	-16,4	-4,4	6,5	15,9	18,6	14,7	7,2	-4,3	-20,7	-29,3
T ₂₀₄₀₋₅₀	-30,8	-25,7	-15,8	-3,8	7,1	16,5	19,2	15,3	7,8	-3,7	-20,1	-28,7
T ₂₀₅₀₋₆₀	-30,6	-25,5	-15,6	-3,6	7,3	16,7	19,4	15,5	8,0	-3,5	-19,9	-28,5
h _s	0,15	0,18	0,21	0,20	h _p = 0,15					0,05	0,12	0,14
ρ _s	0,16	0,19	0,21	0,25						0,11	0,15	0,16
λ _s	0,18	0,21	0,23	0,27	λ _p = 0,35					0,13	0,17	0,18
α	1,22	1,18	1,11	1,37	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,64	1,44	1,31

Мирный

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегоголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1971}	-32,3	-26,0	-17,1	-7,2	3,7	13,5	16,1	12,3	4,9	-7,1	-23,4	-30,8
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₁₋₈₀	-32,6	-26,3	-17,4	-7,5	3,4	13,2	15,8	12,0	4,6	-7,4	-23,7	-31,1
T ₁₉₈₀₋₉₀	-31,9	-25,6	-16,7	-6,8	4,1	13,9	16,5	12,7	5,3	-6,7	-23,0	-30,4
T ₁₉₉₀₋₀₀	-30,9	-24,6	-15,7	-5,8	5,1	14,9	17,5	13,7	6,3	-5,7	-22,0	-29,4
T ₂₀₀₀₋₁₀	-30,8	-24,5	-15,6	-5,7	5,2	15,0	17,6	13,8	6,4	-5,6	-21,9	-29,3
T ₂₀₁₀₋₂₀	-30,6	-24,3	-15,4	-5,5	5,4	15,2	17,8	14,0	6,6	-5,4	-21,7	-29,1
T ₂₀₂₀₋₃₀	-30,4	-24,1	-15,2	-5,3	5,6	15,4	18,0	14,2	6,8	-5,2	-21,5	-28,9
T ₂₀₃₀₋₄₀	-29,6	-23,3	-14,4	-4,5	6,4	16,2	18,8	15,0	7,6	-4,4	-20,7	-28,1
T ₂₀₄₀₋₅₀	-29,1	-22,8	-13,9	-4,0	6,9	16,7	19,3	15,5	8,1	-3,9	-20,2	-27,6
T ₂₀₅₀₋₆₀	-28,5	-22,2	-13,3	-3,4	7,5	17,3	19,9	16,1	8,7	-3,3	-19,6	-27,0
h _s	0,15	0,18	0,20	0,23	h _p = 0,15					0,05	0,12	0,13
ρ _s	0,17	0,20	0,23	0,26						0,11	0,15	0,16
λ _s	0,19	0,22	0,25	0,28	λ _p = 0,29					0,13	0,17	0,18
α	1,29	1,24	1,27	1,23	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	2,64	1,44	1,41

Усть-Мая

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегодовое значение температуры воздуха до рубежного года												
T _{до 1973}	-42,6	-36,1	-21,4	-6,0	6,2	14,5	18,1	14,7	6,3	-7,0	-27,4	-39,3
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₃₋₈₀	-42,5	-36,0	-21,3	-6,0	6,2	14,5	18,1	14,7	6,4	-7,0	-27,3	-39,2
T ₁₉₈₀₋₉₀	-42,0	-35,5	-20,8	-5,4	6,8	15,1	18,7	15,2	6,9	-6,4	-26,8	-38,7
T ₁₉₉₀₋₀₀	-40,8	-34,3	-19,6	-4,2	8,0	16,2	19,9	16,4	8,1	-5,2	-25,6	-37,5
T ₂₀₀₀₋₁₀	-40,8	-34,3	-19,6	-4,2	8,0	16,3	19,9	16,5	8,2	-5,2	-25,6	-37,5
T ₂₀₁₀₋₂₀	-40,6	-34,1	-19,3	-4,0	8,2	16,5	20,1	16,7	8,4	-5,0	-25,3	-37,3
T ₂₀₂₀₋₃₀	-40,1	-33,6	-18,9	-3,5	8,7	16,9	20,6	17,1	8,8	-4,5	-24,9	-36,8
T ₂₀₃₀₋₄₀	-40,1	-33,6	-18,9	-3,5	8,7	17,0	20,6	17,1	8,8	-4,5	-24,9	-36,8
T ₂₀₄₀₋₅₀	-38,9	-32,4	-17,6	-2,3	9,9	18,2	21,8	18,4	10,1	-3,3	-23,7	-35,6
T ₂₀₅₀₋₆₀	-39,0	-32,5	-17,8	-2,4	9,8	18,1	21,7	18,3	9,9	-3,4	-23,8	-35,7
h _s	0,15	0,18	0,21	0,21	h _p = 0,10					0,06	0,12	0,13
ρ _s	0,14	0,16	0,21	0,23						0,09	0,13	0,15
λ _s	0,16	0,18	0,23	0,25	λ _p = 0,23					0,11	0,15	0,17
α	1,08	1,02	1,11	1,21	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	1,87	1,27	1,33

Чоккурдах

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегодовое значение температуры воздуха до рубежного года												
T _{до 1970}	-30,0	-36,5	-32,5	-19,1	-5,0	9,5	12,0	8,9	1,0	-14,3	-30,1	-30,7
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₀₋₈₀	-29,6	-36,1	-32,1	-18,7	-4,6	9,9	12,4	9,3	1,4	-13,9	-29,7	-30,3
T ₁₉₈₀₋₉₀	-30,0	-36,5	-32,5	-19,1	-5,0	9,5	12,0	8,9	1,0	-14,3	-30,1	-30,7
T ₁₉₉₀₋₀₀	-29,5	-36,0	-32,0	-18,6	-4,5	10,0	12,5	9,4	1,5	-13,8	-29,6	-30,2
T ₂₀₀₀₋₁₀	-29,6	-36,1	-32,1	-18,7	-4,6	9,9	12,4	9,3	1,4	-13,9	-29,7	-30,3
T ₂₀₁₀₋₂₀	-29,1	-35,6	-31,6	-18,2	-4,1	10,4	12,9	9,8	1,9	-13,4	-29,2	-29,8
T ₂₀₂₀₋₃₀	-29,3	-35,8	-31,8	-18,4	-4,3	10,2	12,7	9,6	1,7	-13,6	-29,4	-30,0
T ₂₀₃₀₋₄₀	-29,2	-35,7	-31,7	-18,3	-4,2	10,3	12,8	9,7	1,8	-13,5	-29,3	-29,9
T ₂₀₄₀₋₅₀	-29,4	-35,9	-31,9	-18,5	-4,4	10,1	12,6	9,5	1,6	-13,7	-29,5	-30,1
T ₂₀₅₀₋₆₀	-29,7	-36,2	-32,2	-18,8	-4,7	9,8	12,3	9,2	1,3	-14,0	-29,8	-30,4
h _s	0,19	0,21	0,24	0,29	0,30	h _p = 0,05				0,10	0,14	0,17
ρ _s	0,29	0,30	0,32	0,33	0,34					0,20	0,23	0,26
λ _s	0,31	0,32	0,34	0,35	0,36	λ _p = 0,23				0,22	0,25	0,28
α	1,65	1,55	1,44	1,22	1,22	4,6	4,6	4,6	4,6	2,23	1,81	1,67

продолжение приложения 7

Верхоянск

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1969}	-47,5	-43,8	-31,0	-13,3	2,3	12,7	15,1	11,1	2,5	-14,7	-36,0	-44,6
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₆₉₋₈₀	-47,2	-43,5	-30,7	-13,0	2,6	13,0	15,4	11,4	2,8	-14,4	-35,7	-44,3
T ₁₉₈₀₋₉₀	-46,5	-42,8	-30,0	-12,3	3,3	13,7	16,1	12,1	3,5	-13,7	-35,0	-43,6
T ₁₉₉₀₋₀₀	-46,3	-42,6	-29,8	-12,1	3,5	13,9	16,3	12,3	3,7	-13,5	-34,8	-43,4
T ₂₀₀₀₋₁₀	-46,1	-42,4	-29,6	-11,9	3,6	14,1	16,5	12,5	3,9	-13,3	-34,6	-43,2
T ₂₀₁₀₋₂₀	-45,9	-42,2	-29,4	-11,7	3,9	14,3	16,7	12,7	4,1	-13,1	-34,4	-43,0
T ₂₀₂₀₋₃₀	-45,7	-42,0	-29,2	-11,5	4,1	14,5	16,9	12,9	4,3	-12,9	-34,2	-42,8
T ₂₀₃₀₋₄₀	-45,0	-41,3	-28,5	-10,8	4,8	15,2	17,6	13,6	5,0	-12,2	-33,5	-42,1
T ₂₀₄₀₋₅₀	-44,9	-41,2	-28,4	-10,7	4,9	15,3	17,7	13,7	5,1	-12,1	-33,4	-42,0
T ₂₀₅₀₋₆₀	-44,5	-40,8	-28,0	-10,3	5,3	15,7	18,1	14,1	5,5	-11,7	-33,0	-41,6
h _s	0,20	0,23	0,24	0,26	h _p = 0,10					0,09	0,14	0,17
ρ _s	0,13	0,17	0,19	0,22						0,10	0,11	0,12
λ _s	0,15	0,19	0,21	0,24	λ _p = 0,29					0,12	0,13	0,14
α	0,76	0,84	0,89	0,94	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	1,36	0,94	0,84

продолжение приложения 7

Витим

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднемноголетняя температура воздуха до рубежного года												
T _{до 1971}	-29,2	-26,3	-16,1	-3,6	5,7	14,3	17,8	14,7	6,5	-3,4	-18,1	-27,1
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₁₋₈₀	-29,4	-26,5	-16,3	-3,8	5,5	14,1	17,6	14,5	6,3	-3,6	-18,3	-27,3
T ₁₉₈₀₋₉₀	-28,3	-25,4	-15,2	-2,7	6,6	15,2	18,7	15,6	7,4	-2,5	-17,2	-26,2
T ₁₉₉₀₋₀₀	-27,9	-25,0	-14,8	-2,3	7,0	15,6	19,1	16,0	7,8	-2,1	-16,8	-25,8
T ₂₀₀₀₋₁₀	-27,8	-24,9	-14,7	-2,2	7,1	15,7	19,2	16,1	7,9	-2,0	-16,7	-25,7
T ₂₀₁₀₋₂₀	-27,6	-24,7	-14,5	-2,0	7,3	15,9	19,4	16,3	8,1	-1,8	-16,5	-25,5
T ₂₀₂₀₋₃₀	-27,5	-24,6	-14,4	-1,9	7,4	16,0	19,5	16,4	8,2	-1,7	-16,4	-25,4
h _s	0,22	0,25	0,27	0,27	h _p = 0,10					0,12	0,15	0,19
ρ _s	0,21	0,23	0,25	0,25	-					0,14	0,17	0,20
λ _s	0,23	0,25	0,27	0,27	λ _p = 0,29					0,16	0,19	0,22
α	1,06	1,01	1,01	1,01	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	1,35	1,29	1,18

продолжение приложения 7

Оймякон

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегодовое значение температуры воздуха до рубежного года												
T _{до 1971}	-47,5	-43,1	-32,5	-15,5	1,1	11,7	13,4	10,8	2,1	-16,4	-37,1	-45,5
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₇₁₋₈₀	-47,5	-43,1	-32,5	-15,5	1,1	11,7	13,4	10,8	2,1	-16,4	-37,1	-45,5
T ₁₉₈₀₋₉₀	-47,1	-42,7	-32,1	-15,1	1,5	12,1	13,8	11,2	2,5	-16,0	-36,7	-45,1
T ₁₉₉₀₋₀₀	-47,3	-42,9	-32,3	-15,3	1,3	11,9	13,6	11,0	2,3	-16,2	-36,9	-45,3
T ₂₀₀₀₋₁₀	-47,2	-42,8	-32,2	-15,2	1,4	12,0	13,7	11,1	2,4	-16,1	-36,8	-45,2
T ₂₀₁₀₋₂₀	-47,0	-42,6	-32,0	-15,0	1,6	12,2	13,9	11,3	2,6	-15,9	-36,6	-45,0
T ₂₀₂₀₋₃₀	-46,7	-42,3	-31,7	-14,7	1,9	12,5	14,2	11,6	2,9	-15,6	-36,3	-44,7
h _s	0,22	0,26	0,30	0,33	h _p = 0,10					0,15	0,17	0,20
ρ _s	0,15	0,17	0,18	0,20						0,11	0,13	0,14
λ _s	0,17	0,19	0,20	0,22	λ _p = 0,23					0,13	0,15	0,16
α	0,79	0,74	0,68	0,68	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	0,88	0,90	0,81

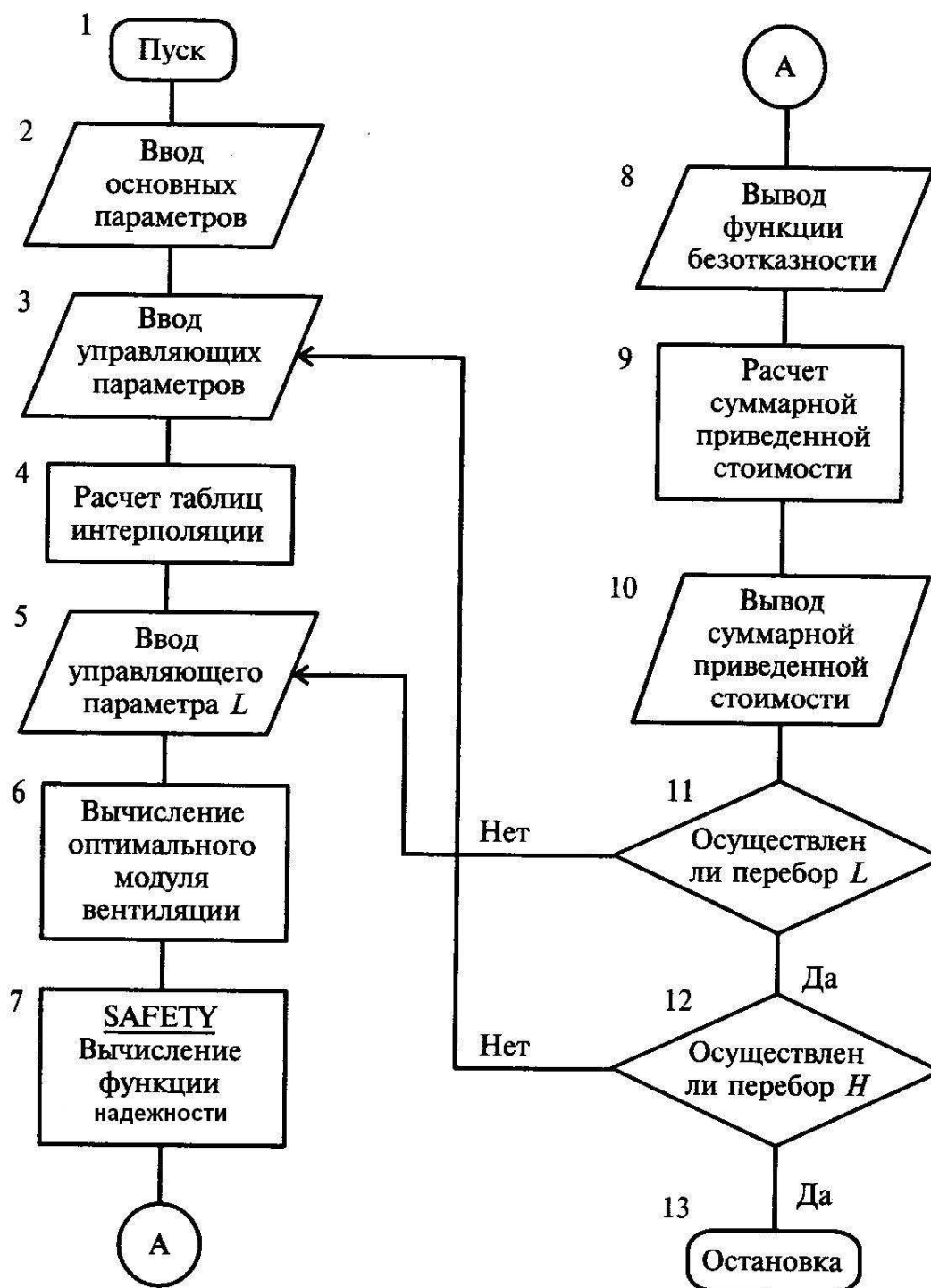
окончание приложения 7

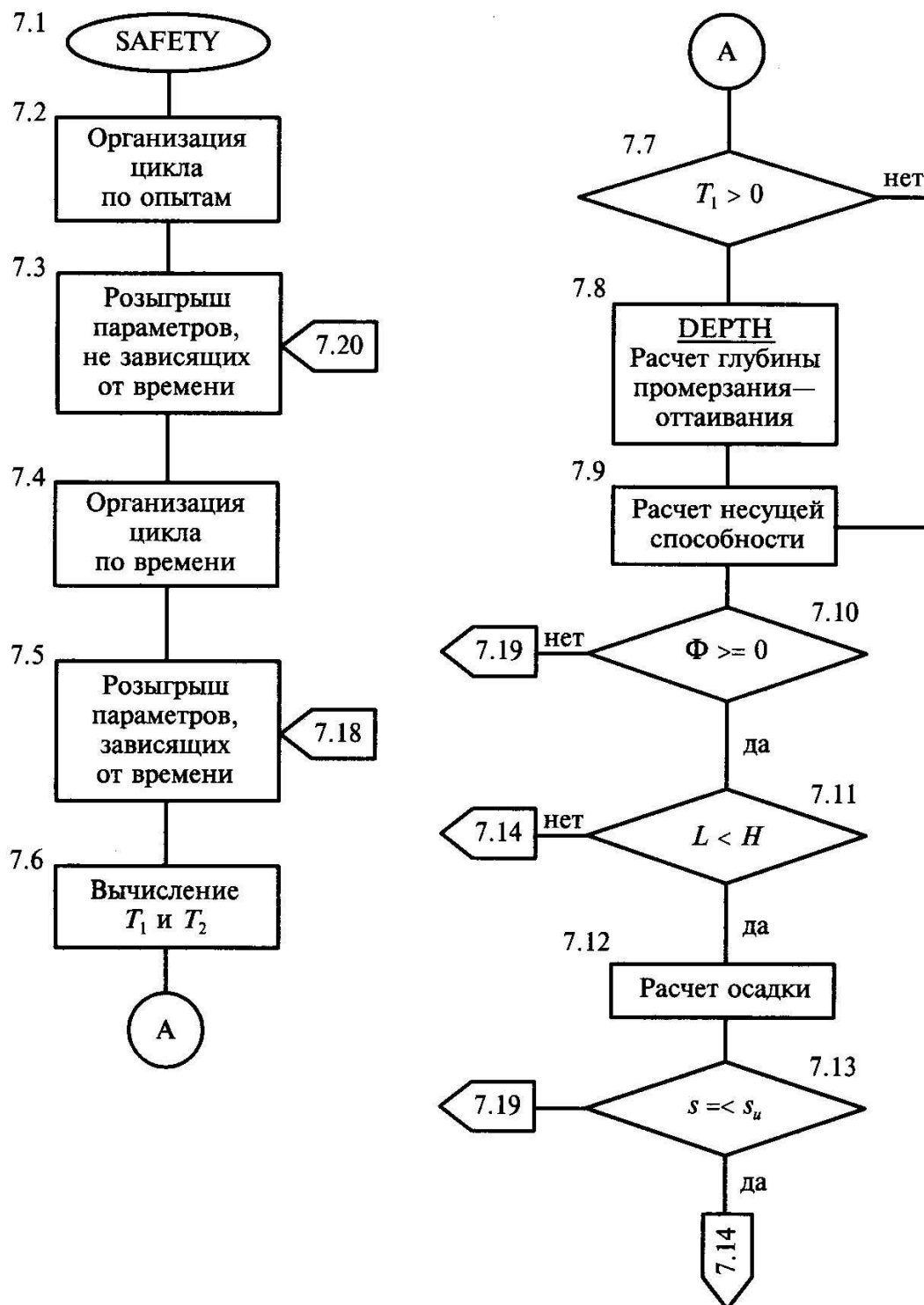
Саскылах

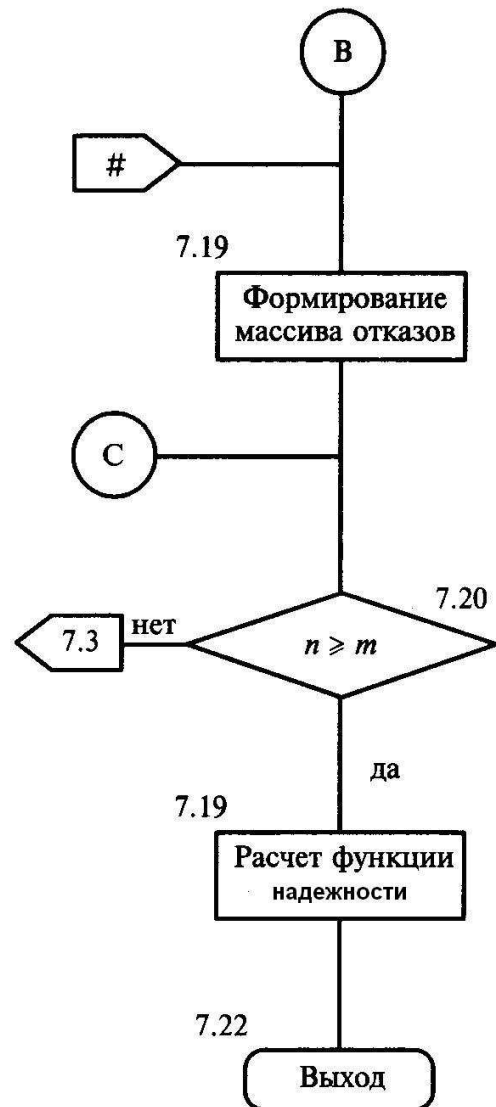
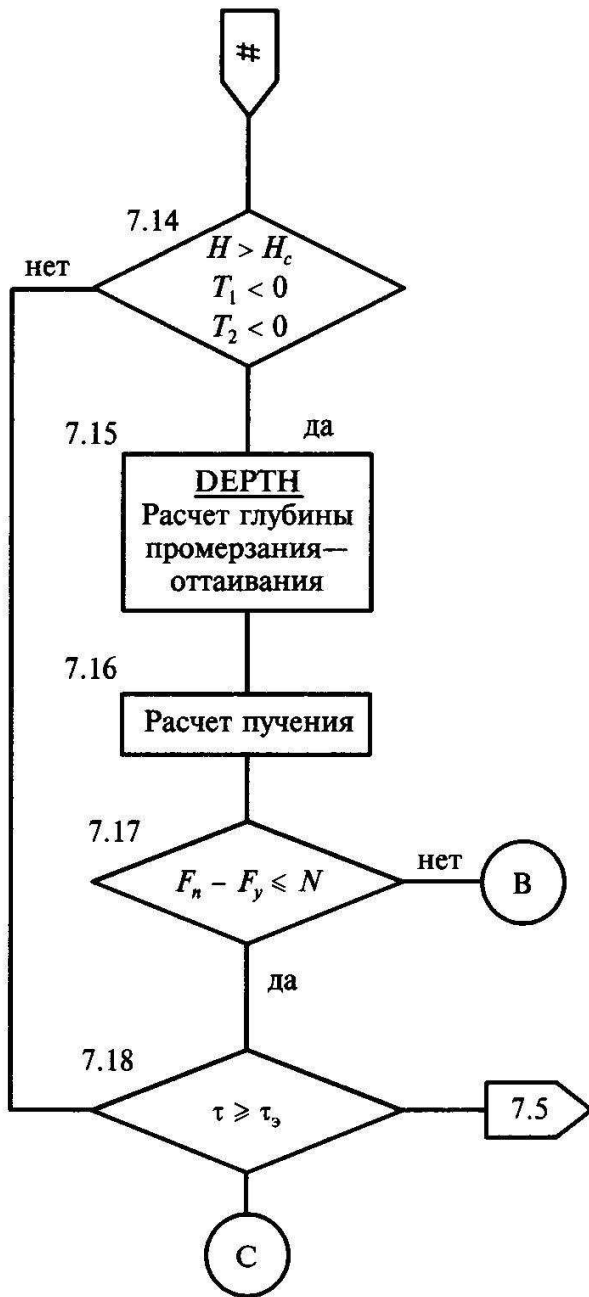
Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднегодовое значение температуры воздуха до рубежного года												
T _{до 1981}	-35,2	-32,7	-29,0	-19,5	-8,1	5,6	12,4	8,7	1,0	-13,0	-28,2	-31,3
Температура воздуха с учетом тренда												
T ₁₉₈₁₋₉₀	-35,9	-33,4	-29,7	-20,2	-8,8	4,9	11,7	8,0	0,3	-13,7	-28,9	-32,0
T ₁₉₉₀₋₀₀	-35,1	-32,6	-28,9	-19,4	-8,0	5,7	12,5	8,8	1,1	-12,9	-28,1	-31,2
T ₂₀₀₀₋₁₀	-34,3	-31,8	-28,1	-18,6	-7,2	6,5	13,3	9,6	1,9	-12,1	-27,3	-30,4
T ₂₀₁₀₋₂₀	-34,6	-32,1	-28,4	-18,9	-7,5	6,2	13,0	9,3	1,6	-12,4	-27,6	-30,7
T ₂₀₂₀₋₃₀	-34,4	-31,9	-28,2	-18,7	-7,3	6,4	13,2	9,5	1,8	-12,2	-27,4	-30,5
h _s	0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	h _p = 0,10				0,18	0,21	0,23
ρ _s	0,17	0,19	0,21	0,22	0,22	-				0,13	0,14	0,16
λ _s	0,19	0,21	0,23	0,24	0,24	λ _p = 0,17				0,15	0,16	0,18
α	0,74	0,79	0,80	0,79	0,76	1,7	1,7	1,7	1,7	0,85	0,77	0,79

Приложение 8

ОБЩАЯ СХЕМА АЛГОРИТМА ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЯ И БЛОК- СХЕМА ПРОГРАММЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФУНКЦИИ НАДЕЖНОСТИ







ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Состояние объектов инфраструктуры в области распространения многолетнемерзлых пород	11
1.1. Объекты инфраструктуры.....	11
1.2. Населенные пункты и промышленные площадки.....	13
1.3. Магистральные нефте-и газопроводы.....	28
1.4. Автомобильные и железные дороги.....	38
1.5. Вертикальные горные выработки.....	45
1.6. Грунтовые плотины.....	51
Выводы.....	55
Глава 2. Современная динамика среднегодовой температуры воздуха и геокриологические условия рассматриваемых районов.....	56
2.1. Современная динамика среднегодовой температуры воздуха.....	56
2.2. Краткая характеристика геокриологических условий	62
2.2.1. Геокриологические условия территории Европейского Севера России.....	62
2.2.2. Геокриологические условия территории Западной Сибири.....	71
2.2.3. Геокриологические условия территории Средней и Восточной Сибири.....	75
Выводы.....	76
Глава 3. Ретроспективный анализ данных многолетних наблюдений за температурой воздуха.....	79
3.1. Методика обработки данных многолетних наблюдений.....	79
3.2. Верификация прогнозных формул изменения температуры воздуха.....	87
3.3. Прогноз изменения температуры воздуха на ближайшие 30-50 лет.....	92
Выводы.....	103
Глава 4. Прогноз геокриологических условий территорий Европейского Севера, Западной, Средней и Восточной Сибири.....	104
4.1. Методика прогноза.....	104
4.2. Результаты прогноза.....	107
4.3. Схематические прогнозные карты изменения среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород.....	122
Выводы.....	126

Глава 5. Прогноз надежности геотехнических систем в области распространения многолетнемерзлых грунтов в условиях глобального изменения климата.....	127
5.1. Принятая терминология.....	127
5.2. Физические предпосылки теории надежности грунтовых оснований.....	128
5.3. Математическая формулировка задачи оценки надежности оснований инженерных сооружений и методы ее решения.....	131
5.4. Численный метод определения функции надежности.....	136
5.5. Аналитические методы определения функции надежности.....	142
5.6. Примеры решения задач.....	148
Выводы.....	152
 Глава 6. Выбор оптимальных решений при проектировании инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах с учетом глобального изменения климата.....	 153
6.1. Оценка опасности (риска) разрушения сооружения до окончания срока его эксплуатации. Цена риска.....	153
6.2. Формулировка и методы решение оптимизационной задачи.....	154
6.3. Использование результатов решения оптимизационной задачи при проектировании.....	163
Выводы.....	183
 Глава 7. Методы борьбы с негативными последствиями климатических изменений.....	 186
7.1. Наблюдения за температурой грунтов в основании инженерных сооружений.....	186
7.2. Прогноз температурного режима оснований инженерных сооружений на основе данных наблюдений за температурой грунта.....	194
7.3. Компьютерная диагностика состояний инженерных сооружений... ..	197
7.4. Управление надежностью геотехнической системы.....	200
Выводы.....	212
 Заключение.....	 213
 ЛИТЕРАТУРА.....	 216
 Приложения.....	 222
<i>Приложение 1. Параметры для прогнозной формулы температуры воздуха ряда метеостанций России.....</i>	<i>222</i>
<i>Приложение 2. Геологические, геокриологические и теплофизические характеристики пород, использованные при моделировании темпера-</i>	

турных полей пород в районе ряда метеостанций Европейского Севера России	237
<i>Приложение 3.</i> Верхние граничные условия для моделирования теплового поля пород в районе ряда метеостанций Европейского Севера России.....	238
<i>Приложение 4.</i> Геологические, геокриологические и теплофизические характеристики пород, использованные при моделировании температурных полей пород в районе ряда метеостанций Западной Сибири.....	241
<i>Приложение 5.</i> Верхние граничные условия для моделирования теплового поля пород в районе ряда метеостанций Западной Сибири.....	242
<i>Приложение 6.</i> Геологические, геокриологические и теплофизические характеристики пород, использованные при моделировании температурных полей пород в районе ряда метеостанций Средней и Восточной Сибири.....	246
<i>Приложение 7.</i> Верхние граничные условия для моделирования теплового поля пород в районе ряда метеостанций Средней и Восточной Сибири.....	248
<i>Приложение 8.</i> Общая схема алгоритма вероятностно-статистического расчета основания здания и блок-схема программы вычисления функции безотказности.....	254