НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 1, с. 47—58

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.340:551.345

МЕРЗЛОТНО-КЛИМАТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РОССИИ: МЕТОДОЛОГИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ, ПРОГНОЗ

А.В. Павлов

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО), 142452, Москва, Россия

Современные изменения климата и криолитозоны изучались на основе данных северных метеорологических станций и геокриологических стационаров, расположенных в различных регионах России.

Начиная с середины 60-х гг. XX в., на территории России повсеместно отмечается потепление климата и верхних горизонтов криолитозоны. Тренд повышения температуры воздуха за последние 30 лет составляет 0,02—0,03 °С/год для Европейского севера, 0,03—0,07 °С/год — для севера Западной Сибири и 0,01—0,08 °С/год — для Якутии. К 2050 г. прогнозируется умеренное потепление климата в высоких широтах, с повышением температуры воздуха до 2 °С.

Данные мониторинга криолитозоны свидетельствуют о повышении температуры мерзлых грунтов за последние 15—20 лет до 2—2,5 °С на глубине 3 м и до 1 °С на глубине 10 м. Это вызвано повсеместным потеплением климата, а в ряде районов и возрастанием снегоотложений. Возможное повышение температуры верхних горизонтов сплошной криолитозоны в условиях Западной Сибири составит к 2020 г. около 1 °С, а к 2050 г. — 1,5—2 °С. Максимальные вариации глубины сезонного протаивания в многолетнем периоде отмечаются для грунтов органического происхождения. Экспериментально выявлена слабая тенденция к возрастанию мощности сезонноталого слоя во времени.

Криолитозона, климат, мониторинг, прогноз

PERMAFROST-CLIMATIC MONITORING OF RUSSIA: METHODOLOGY, RESULTS OF OBSERVATION AND FORECAST

A. V. Pavlov

All-Russian Research Institute for Hydrogeology and Engineering Geology (VSEGINGEO) 142452, Moscow, Russia

The modern changes of climate and permafrost were studied on the basis of the data of northern meteorological stations and permafrost stations, located in various regions of Russia.

Everywhere on territory of Russia it was marked warming of a Climate and upper part of Permafrost since the middle 1960's. The trends toward an air temperature during 1965 — 95 varies over a wide range, from 0 to 0.08 °C/year. By 2050 the temperate Climate Warming is predicted in Northern latitude with increase of air temperature up to 2 °C.

The Permafrost Monitoring data testify in increase of Permafrost Temperature for the last 15—20 years up to 2—2,5 °C on the depth 3 м and up to 1 °C on the depth 10 m. Possible increase of the temperature of the upper part of Permafrost of Western Siberia will make about 1 °C by 2020, and — 1,5—2 °C by 2050. The weak tendency to increase depth of Active Layer depth is revealed experimentally.

Permafrost, climate, monitoring, forecast

ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ И ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Криолитозона и область глубокого сезонного промерзания занимают в России около 80% территории. Криолитозона имеет также широкое распространение в Канаде (примерно на 50% территории страны), Монголии, Китае; она охватывает значительную часть Аляски. Возникновение и развитие криолитозоны в региональном и планетарном масштабах обусловлено изменениями климата.

Изучение взаимосвязей между климатом и криолитозоной началось с работ Г.И.Вильда [*Вильд, 1882*], Л.А. Ячевского [*Ячевский, 1889*] и было продолжено М.И. Сумгиным [*Сумгин, 1937*], В.А.Кудрявцевым [*Кудрявцев, 1954*], и др. Начиная с 60-х гг. XX в., научная общественность России, Канады, США и других стран стала уделять все возрастающее внимание проблеме ожидаемых глобальных и региональных изменений климата и криолитозоны [*Борисенков, 1990; Будыко и др., 1991; Величко и др., 1992; Шполянская, 1990; Cheng Gudong et al., 1993; Lachenbruch et al., 1988; Mackay, 1995; Manabe et al., 1980; Nelson et al., 1993; Pavlov, 1994; Romanovsky et al., 1995*]. 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 похолодания [*Шполянская, 1990*]. Сопряженный анализ метеорологической и геокриологической информации позволяет оценить роль современного климата в формировании динамики криолитозоны и ее ожидаемой деградации.

Продолжительность инструментальных метеорологических измерений на севере России достигает 180 лет. До недавнего времени сеть метеостанций была здесь достаточно разветвленной, однако в последние 3—5 лет отмечается, к сожалению, заметное сокращение числа метеостанций.

Вопрос о планомерном изучении криолитозоны путем организации специальных стационаров был впервые поставлен М. И. Сумгиным еще в 30-е гг. Выполнение пионерных стационарных работ на экспериментальных площадках в ряде районов севера России (Воркута, Игарка, Якутск и др.) связывается, в первую очередь, с именами П.И.Мельникова, В.П.Бакакина, А.В. Голубева, С.В. Шимановского. В 60—70-е гг. изучение режима геокриологических условий получило в России широкое развитие в связи с открытием уникальных месторождений углеводородного сырья на севере Западной Сибири и Европейском Севере, сельскохозяйственным и промышленным освоением Якутии, строительством Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. За истекшие годы сформировались крупные территориально-промышленные комплексы (Западно-Сибирский нефтегазовый, Норильский горнообогатительный, Западно-Якутский алмазодобывающий), построены новые города и поселки (Мирный, Тында, Ямбург), возведены магистральные трубопроводы. Мощное техногенное воздействие усиливает развитие негативных изменений геологической среды на Севере. Развитие геокриологического мониторинга (мониторинга криолитозоны), представляющего собой систему наблюдений, оценки, контроля и прогноза состояния геологической среды на территории многолетней и сезонной криолитозон [*Мельников и др., 1993*], позволяет избежать кризисных и катастрофических ситуаций в холодных регионах. Геокриологический мониторинг обеспечивает решение задач федерального, территориального и объектного уровней [*Мельников и др., 1996; Павлов, 1992*].

Информационная сеть мониторинга криолитозоны включает в себя трех-уровневую иерархию опорных наблюдательных объектов: региональные (фоновые) стационары, площадные стационары (непосредственно на объектах интенсивного техногенеза) и пункты постоянного или периодического фукционирования (площадки, профили, закрепленные точки или скважины) [*Изучение инженерно-геологических..., 1992; Mackay, 1995*]. Наблюдения охватывают как естественные, так и нарушенные природные условия. Методология ведения мониторинга криолитозоны базируется на ландшафтном (геосистемном) подходе, регламентирующем расположение наблюдательных сетей, глубинности изучения, сроков наблюдений и пр. [*Изучение инженерно-геологических..., 1992*].

Региональный геокриологический стационар является основой наблюдательной сети мониторинга криолитозоны. Стационары целесообразно размещать в наиболее крупных (доминантных) типах природного комплекса в ранге ландшафтного (физико-географического) района или подпровинции [*Изучение инженерно-геологических..., 1992*]. При выборе опорного района размещения стационара необходимо учесть морфологию многолетнемерзлых пород (мощность, прерывистость), типы геологического разреза, активность проявления криогенных геологических процессов, размеры и доступность изучаемой территории, размещение ближайших метеостанций. Срок работы стационара устанавливается не менее 10 лет. В отличие от регионального стационара, конкретизация участка площадного стационара осуществляется главным образом не по морфологической структуре природных комплексов, а на основе изучения криогенных геологических процессов и форм их проявления [*Изучение инженерно-геологических..., 1992*]. Для оборудования стационара наиболее рациональными являются участки, на которых полнее всего представлен комплекс криогенных геологических процессов и отмечается их максимальная активность. При выборе местоположения стационара учитывается также существующий и ожидаемый тип техногенных нарушений, схема размещения действующих (или проектируемых) линейных сооружений, наличие термометрических скважин. Основными наблюдаемыми показателями мониторинга криолитозоны являются температура грунтов, глубина сезонного протаивания, развитие криогенных геологических процессов; дополнительными показателями — температура воздуха, снежный и растительный покровы.

К началу 90-х гг. на территории криолитозоны России функционировало около 25 геокриологических стационаров, на каждом из которых было оборудовано по 8—10 наблюдательных площадок (включая фоновые и техногенные) и профилей, и по 20—30 термометрических скважин глубиной 10—15 м. На 2/3 от общего числа стационаров выполнялись сезонные работы, на 1/3 части — непрерывные круглогодичные наблюдения. Наибольший объем работ по мониторингу геологической среды выполнен на севере Западной Сибири, в Большеземельской тундре, в Якутии [*Павлов, 1979; Павлов, 1992*]. В то же время вся огромная территория Средней Сибири является «белым пятном» в отношении изученности режима геокриологических условий.

К сожалению, за последние 3—5 лет произошло существенное сокращение наблюдательной сети мониторинга криолитозоны в России, также как и сети метеорологического мониторинга. Возникла опасность утраты режимных геокриологических данных, так как в ряде организаций они не обобщены. Усилиями отдельных специалистов и учреждений удалось сохранить с допустимыми сокращениями наблюдательные сети на Европейском северо-востоке (приполярно-тундровая зональная станция; режимные участки Коротаиха, Роговой и др.), в арктических и субарктических районах Западной Сибири (стационары Марре-Сале, Парисенто, Надымский), в Центральной Якутии (стационар Чабыда, режимный участок на правобережье р. Лена) и полярной Якутии (режимные участки в районе Тикси и пос. Черский). На некоторых из названных наблюдательных объектах мониторинга криолитозоны накоплены многолетние (15—25-летние) ряды наблюдений за показателями термического режима грунтов и развития криогенных геологических процессов, которые наравне с метеорологическими рядами являются информационной основой геокриологического прогнозирования.

Функционирование наблюдательных сетей требует широкого применения автоматизированных технических средств. В геокриологии в наибольшей мере разработаны методы автоматизированных наблюдений за термическими показателями криолитозоны. Во ВСЕГИНГЕО и НИИ космического приборостроения завершается разработка системы логгера, предназначенного для регистрации и запоминания сигналов от разнородных датчиков (температура, тепловой поток, уровень воды и др.) [*Дубровин и др., 1995*]. По ряду технических характеристик (число подключаемых датчиков, диапазон измерения параметров, срок эксплуатации) логгер не уступает зарубежным аналогам. На основе стационарных работ, выполненных в России в начале 90-х гг. совместно со специалистами Канады, США и Японии, оптимизированы пути комплексирования российских и зарубежных приборов (опробователь сезонноталого слоя, тепломер, термопаук, логгер) при осуществлении мониторинга. Выявлены хорошая сопоставимость, точность и взаимозаменяемость российских и зарубежных методов термических измерений.

В последнее десятилетие мониторинг криолитозоны активно развивается в зарубежных странах. Одним из лучших образцов производственного мониторинга в мировой практике является экогеологический мониторинг трассы северного нефтепровода Норман-Уэлс — Зама в Канаде [*Гречищев и др., 1995*]. В рамках программы циркумполярного мониторинга сезонноталого слоя (CALM) при поддержке IPA (Международная ассоциация геокриологов) и программы ITEX (Международный тундровый эксперимент) в Российской Арктике (Полярный Урал, Ямал, Гыдан, Таймыр, Колыма, Анадырь) организованы измерения глубины сезонного протаивания на экспериментальных площадках 1·1 км [*Аккерман и др., 1996*]. Поскольку для оценки влияния климатических факторов на криолитозону требуются длительные ряды наблюдений, эти вновь начатые эксперименты не могут возместить потери информации, связанные с закрытием геокриологических стационаров длительного функционирования.

Анализ инструментальных метеорологических данных позволяет выделить два периода с отчетливо выраженным повышением температур воздуха: с конца XIX в. до 50-х гг. XX в. („Потепление Арктики") и с середины 60-х гг. до настоящего времени. В литературе имеются свидетельства, что полувековое „Потепление Арктики" повлекло за собой повышение температур грунтов даже севернее Полярного круга, возрастание размеров таликовых зон, усиление термокарста и некоторых других криогенных геологических процессов; южная граница леса продвинулась в северном направлении до 30 км. Последнее зафиксированное инструментально потепление климата, начавшееся в 60-х гг., сопровождается отчетливо выраженным повышением температур грунта; активизацией оползней-сплывов и термоабразии. Если тенденция к потеплению климата на Севере сохранится в XXI в., это приведет к опасным последствиям: усилению деградации мерзлых пород в пространстве и по вертикали, активизации деструктивных криогенных геологических процессов, нарушению функционирования природных и природно-технических систем. Поэтому оценка современных и предсказание ожидаемых мерзлотно-климатических изменений представляет собой одну из приоритетных проблем в науках о Земле и имеет большое практическое значение.

Согласно существующим представлениям, возможность глобального потепления современного климата связывается главным образом с увеличением парникового эффекта атмосферы вследствие накопления в ней двуокиси углерода

(CO_2), метана (CH_4), окислов азота и других малых примесей газов. Недавние прогнозные оценки крупных метеорологов о возможности двухкратного увеличения эквивалента CO_2 в атмосфере к середине следующего столетия сейчас сменились более осторожными. Так, согласно прогнозу М.И.Будыко и др. [*Будыко и др., 1992*], можно ожидать повышение эквивалента CO_2 в атмосфере к 2050 г. в 1,42 раза и к 2100 г. в 1,77 раза. При максимальной прогнозной оценке удвоение CO_2 может наступить к 2075 г., при минимальной оценке ожидаемое повышение CO_2 не превысит 1,17 раза. По этому прогнозу при возрастании CO_2 в атмосфере в 1,8—2 раза повышение глобальной температуры воздуха составит 3 °С и более. Е.П.Борисенков [*Борисенков, 1990*] прогнозирует существенно меньший возможный прирост глобально-осредненной температуры воздуха. По его оценкам, даже двухкратное увеличение CO_2 в атмосфере вызовет возрастание температуры воздуха максимум на 2—2,5 °С.

Природную среду высоких широт считают чувствительным индикатором развития глобальных физико-географических процессов. Поэтому полагают, что ожидаемое в XXI в. потепление климата на Севере и особенно за Полярным кругом должно быть намного значительнее, чем глобально-осредненное потепление [*Величко и др., 1992; Manabe et al., 1980; Nelson et al., 1993; Nelson, Lachenbruch et al., 1993*]. Вместе с тем вывод о повышении контрастности ожидаемого потепления климата с возрастанием широты не является бесспорным.

Построение сценариев современного глобального потепления климата чаще всего осуществляется или с помощью ретроспективного метода анализа метеорологических рядов, или путем использования результатов, полученных применением численных радиационно-циркуляционных моделей атмосферы. Оба сценария являются далеко не совершенными и достоверность прогнозирования не поддается количественной оценке.

Исходя из сценария глобального потепления климата, в ряде работ составлен прогноз эволюции криолитозоны на территории России и Северной Америки в следующем столетии [*Павлов, 1994; Шполянская, 1990; Температура, криолитозона..., 1994; Nelson et al., 1993; Vyalov et al., 1993; Zhang et al., 1993*]. По разным оценкам к 2050 г. в России можно ожидать сокращения площади сплошной криолитозоны на 15—50 % и повышение ее температуры на 2—3 °С. Для прогнозирования изменений геокриологических условий в будущем здесь использован ретроспективный анализ рядов наблюдений на объектах мониторинга криолитозоны, а также метод моделирования геотемпературных полей. Полученные оценки являются, скорее всего, экстремальными.

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ И ОЖИДАЕМЫХ В XXI В. КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СЕВЕРЕ

Анализ климатических изменений на территории криолитозоны выполнен по данным более 40 метеостанций, расположенных на Европейском севере, севере Западной Сибири, в Якутии, на Северо-Востоке.

По каждой метеостанции были вычислены средние скользящие 10-летние значения среднегодовой температуры воздуха, среднелетней и среднезимней. От первых двух показателей зависит формирование температуры и интенсивность промерзания грунтов, третий показатель определяет их сезонное протаивание.

Метеорологическими измерениями выявлено несколько циклов потепления—похолодания на севере России (рис. 1—3). Наиболее четко выраженное потепление („Потепление Арктики"), около 2 °С, приходится на период с конца XIX в. до начала 40-х гг. XX в. Последующее небольшое похолодание охватывает период до середины 60-х гг; затем вновь наступило потепление. За весь период инструментальных метеорологических наблюдений в целом (150—180 лет) тренд в повышении температуры воздуха в арктических районах России четко не проявляется [*Павлов, 1994*]. Наблюдения на метеостанции Барроу в арктической зоне Аляски

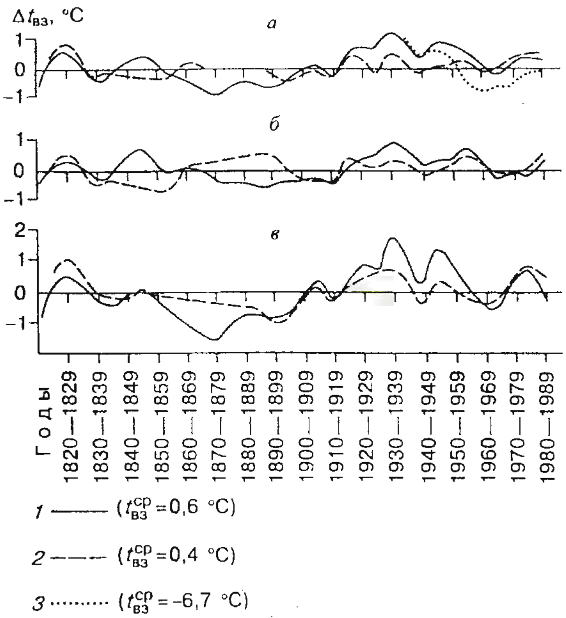

Рис.1. Отклонение, $\Delta t_{вз}$, средних скользящих 10-летних значений температуры воздуха, $t_{вз}$ от нормы в Архангельске (*1*), Сыктывкаре (*2*) и Амдерме (*3*).

а — в среднем за год, *б* и *в* — в среднем за летний и зимний периоды, соответственно.

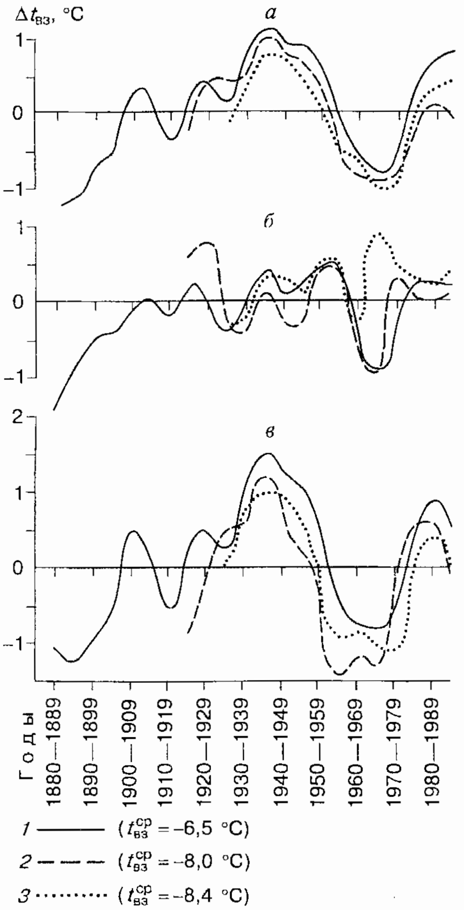

Рис.2. Отклонение, $\Delta t_{вз}$, средних скользящих 10-летних значений температуры воздуха, $t_{вз}$ от нормы в Салехарде (*1*), Марре-Сале (*2*) и Новом Порту (*3*).

а — в среднем за год; *б* и *в* — в среднем за летний и зимний периоды, соответственно.

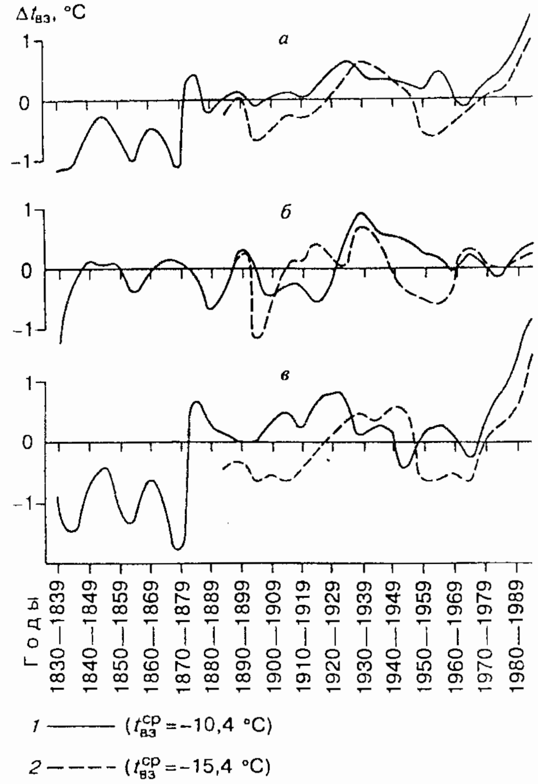

Рис.3. Отклонение, $\Delta t_{вз}$, средних скользящих 10-летних значений температуры воздуха, $t_{вз}$, от нормы в Якутске (*1*) и Верхоянске (*2*)

а — в среднем за год, *б* и *в* — в среднем за летний и зимний периоды, соответственно.

также показывают отсутствие заметного климатического потепления за 1921—1992 гг. [*Nelson, Lachenbruch et al., 1993*]. Это дает основание полагать, что в Арктике и смежных регионах вследствие близости северных морей и слабого техногенного воздействия современные потепления—похолодания не выходят за пределы естественной вековой цикличности климата. Однако в Центральной Якутии (и, возможно, в других континентальных районах России) за метеорологический период наблюдений отмечается хорошо выраженное климатическое потепление, составляющее для Якутска 2,4 °С за 1830—1994 гг. Выявлено также повышение температуры воздуха (примерно на 1 °С) за последние 50 лет в долине р. Маккензи (северо-запад Канады) [*Brown et al., 1982; Mackay, 1995*].

Последнее отчетливо выраженное потепление началось повсеместно на Севере в 60-х гг. XX в. По данным отдельных метеостанций, тренд повышения среднегодовых значений $t_{вз}$ за 1965—1994 гг. на территории криолитозоны России изменяется в широких пределах, от 0 до 0,075° С/год. Наибольший тренд повышений $t_{вз}$ отмечается на севере Западной Сибири (Тазовское, Салехард, Надым, Тадибеяха) и в Якутии (Ленск, Чульман, Олекминск, Якутск). Само повышение значений $t_{вз}$ достигало за указанный период 1,8 °С. Слабое повышение температуры воздуха (0,6—0,8 °С) зафиксировано на метеостанциях, расположенных в районах, примыкающих к криолитозоне Европейского севера (Архангельск, Сыктывкар и др.). Региональные оценки, полученные путем обобщения данных по отдельным метеостанциям, показывают, что тренд повышения температур воздуха на севере России за длительный холодный период в 1,2—1,5 раза больше, чем за короткий теплый [*Павлов, 1994*]. Это является наглядным подтверждением известного факта, что климатическое потепление обусловлено, в первую очередь, повышением зимней температуры воздуха. Современное климатическое потепление еще не достигло размеров периода „Потепления Арктики" (табл. 1). Более того, в начале 90-х гг. на некоторых арктических метеостанциях отмечалось заметное похолодание. Однако 1993—1995 гг. оказались достаточно теплыми, что явилось причиной сохранения общей тенденции современного потепления климата.

Современные изменения атмосферных осадков и высоты снежного покрова изучены в существенно меньшей мере, чем температуры воздуха. Для района Якутска выявлена общая тенденция возрастания годовых сумм осадков за истекший 100-летний период метеорологических наблюдений [*Павлов, 1994*]. Тренд повышения годовых сумм осадков в Якутске за 35-летний период (1940—1975 гг.) составил около 1,6 мм/год, а летних — 1,2 мм/год. С середины 70-х гг. наблюдениями фиксируется заметное снижение осадков. Отмечается несоответствие в многолетней цикличности осадков и температуры воздуха. Высота снежного покрова (h_c) в Якутске увеличивалась с середины 50-х гг. до начала 80-х гг., тренд нарастания h_c составил примерно 0,7 см/год. В последнее десятилетие здесь отмечается уменьшение высоты снежного покрова. В условиях Западного Ямала (метеостанция Марре-Сале) наблюдается, начиная с 60-х гг., возрастание снегоотложений, особенно отчетливо выраженное в последнее десятилетие. Тренд повышения h_c составляет 0,5 см/год. Косвенные доказательства свидетельствуют также о наметившейся тенденции к современному возрастанию снегоотложений на севере Аляски [*Nelson et al., 1993; Pavlov, 1994*]. Напротив, в районе Инувика (северо-запад Канады) зафиксировано уменьшение сумм осадков и высоты снегоотложений за 1960—1993 гг. [*Mackay, 1995*]. Тренд уменьшения осадков составил здесь 2,2 мм/год. Таким образом, в различных холодных регионах Северного полушария современные изменения осадков и снегоотложений протекают неодинаково.

Разброс прогнозных значений содержания эквивалента CO_2 в атмосфере в XXI в. чрезвычайно широк. При возможных темпах возрастания CO_2 в 1,75—1,8 раза к 2100 г., увеличение средней глобальной температуры воздуха составит 1,5 °С к 2025 г., 2 °С к 2050 г. и 3,1 °С к 2100 г. Среднеширотный градиент ожидаемого повышения температуры воздуха в Арктике ряд исследователей оценивает в 2—2,5 °С на 10° с.ш. [*Manabe et al., 1980; Nelson et al., 1993*]. При таких значительных градиентах возможное повышение температуры воздуха на середину следующего столетия прогнозируется в 6—12 °С (до 15 °С) в диапазоне 60—80° с.ш. В.Т.Балобаев [*Температура, криолитозона..., 1994*], исходя из возможного удвоения концентрации CO_2 в атмосфере в конце XXI в., прогнозирует приращение температуры воздуха на севере Западной Сибири в 0,8—1,4 °С на 2020 г., 2,9—3,2 °С на 2050 г. и 4,3—6,6 °С — на 2100 г.

Таблица 1. **Повышение температуры воздуха на севере России по данным метеорологических наблюдений, °С**

Пункт	Период	
	„Потепление Арктики" (1885—1955 гг.)	Современное потепление (1965—1995 гг.)
Архангельск	2,1	0,6
Салехард	2,3	1,6
Якутск	1,7	1,4

Палеоклиматические аналоги используются на том основании, что для различных уровней ожидаемого повышения температуры воздуха можно найти близкие аналоги климата в прошлом. Обычно используют 3 сценария палеоклимата: оптимум плиоцена, последнее (микулинское) межледниковье и оптимум плиоцена [*Антропогенные изменения климата, 1987; Величко и др., 1992; Павлов, 1994; Nelson et al., 1993*]. Повышение температуры воздуха в высоких широтах при наиболее сильном потеплении (оптимум плиоцена) оценивается в 11—13 °С. Расчет по радиационно-циркуляционной модели при возможном удвоении содержания CO_2 в атмосфере дает поширотное распределение температуры воздуха, близкое к сценарию микулинского межледниковья (повышение глобально-осредненной температуры воздуха на 2 °С и на 70—80 ° с.ш. на 6—7 °С). Нередко в прогнозах используют климатический сценарий оптимума голоцена (глобально-осредненная температура воздуха возрастала на 1,2 °С, а в высоких широтах на 4,4—5,2 °С).

Предположение о повышении контрастности ожидаемого потепления климата с возрастанием широты местности не является бесспорным. Поэтому автором была осуществлена оценка современных изменений температуры воздуха $t_{вз}$ (за 1965—1995 гг.) в субмеридиональном направлении. По данным 14 метеостанций, расположенных в зоне „Ямальского субмеридиана" рассчитаны средние скользящие 10-летние значения $t_{вз}$ за рассматриваемый период и на их основе определены повышения $t_{вз}$ (табл.2). Широтный интервал расположения метеостанций изменялся от 74°20′ с.ш. (о-в Белый) до 58°12′ (Тобольск). Ретроспективный анализ метеоданных показывает, что повышение среднегодовой температуры воздуха за последние 25—30 лет оценивается в 0,8—1,6 °С и не связан с географической широтой местности. Не отмечается также широтной зональности в формировании повышений температуры воздуха летом и зимой (см. табл. 2). Наоборот, при использовании палеоклиматических реконструкций максимум прогнозируемого повышения $t_{вз}$ отмечается в районах Арктики. Таким образом, правомочность использования палеоданных для реконструкции современных изменений климата далеко не очевидна.

Один из путей предсказания изменений климата основан на анализе данных метеостанций. При условии сохранения в будущем тренда современного климатического потепления, составлен прогноз повышения температуры воздуха в северных регионах России в первой половине XXI в.:

Регион	2020 г.	2050 г.
Европейский Север	0,5—0,8	1,1—1,6
Север Западной Сибири	0,6—1,5	1,6—3,8
Якутия	0,2—2,0	0,6—4,4

Для севера Западной Сибири приведенные данные удовлетворительно согласуются с результатами прогнозных расчетов В.Т.Балобаева по радиационной модели при условии удвоения CO_2 в атмосфере на конец XXI в. [*Температура, криолитозона..., 1994*].

Климатические потепления в прошлом сопровождались возрастанием общего увлажнения атмосферы в результате роста испарения с океанов и суши вследствие увеличения атмосферных осадков. Прогноз годовых сумм осадков, выполненный на основе ретроспективного анализа метеорологических рядов, дает их повышение на севере Западной Сибири на 5% к 2020 г. и на 12% к 2050 г. Ряд метеорологов оценивают возможное повышение годовых сумм осадков на 2050 г. в 5—100 мм [*Антропогенные изменения климата, 1987*].

Таблица 2. Повышение средних скользящих 10-летних температур воздуха в направлении „Ямальского субмеридиана", °С (1965—1995 гг.)

Метеостанция*	Период		
	Год	Теплый	Холодный
О-в Белый	1,4	1,0	1,6
Тамбей	1,0	0,9	1,1
Харасавэй	1,1	1,1	1,1
Тадибеяха	1,6	1,3	1,7
Марре-Сале	0,8	1,1	0,7
Антипаюта	1,2	1,1	1,2
Мыс Каменный	1,2	1,4	1,1
Новый Порт	1,3	1,3	1,3
Тазовское	1,5	1,0	1,6
Яр-Сале	1,3	1,7	1,1
Салехард	1,3	1,1	1,4
Надым	1,3	1,3	1,3
Ханты-Мансийск	1,4	1,4	1,4
Тобольск	1,1	0,6	2,6
В среднем по 14 метеостанциям	1,25	1,16	1,37

* Станции в таблице ориентированы с севера на юг.

СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Термический режим верхних горизонтов криолитозоны является индикатором современных климатических колебаний и формируется в первую очередь, под воздействием температуры воздуха и снежного покрова. Повышение температуры воздуха или возрастание снегоотложений может вызвать увеличение глубины сезонного протаивания и образование несливающихся мерзлых толщ, повышение их температуры, активизацию ряда опасных криогенных геологических процессов (наледеобразование, оползни-сплывы и др.).

Убедительные данные о возможности быстрых изменений верхних горизонтов криолитозоны в направлении ее деградации были получены в Игарке (Енисейский Север) и Воркуте (Большеземельская тундра). Экспериментальные площадки в Игарке были организованы в 1940 г. по инициативе П.И.Мельникова; на них непрерывно до 1958 г. проводились наблюдения за температурой грунтов (до глубины 15 м) и сезонным протаиванием. За период наблюдений на естественной площадке выявлено повышение среднегодовой температуры грунтов на глубине 3 м на 1,3 °С (с -0,7 до +0,6 °С) и на глубине 10 м на 0,3 °С. Отмечалось опускание верхней границы многолетнемерзлых пород с 1,7 м (1940 г.) до 3,7 м (1959 г.). В то же время среднегодовая температура воздуха за указанный период составила -7,9 °С и была всего на 0,3 °С выше нормы.

В окрестностях Воркуты систематические термические наблюдения в грунтах проводятся с середины 50-х гг. и продолжаются в настоящее время. Геокриологический стационар был оборудован в 1956 г. на окраине старой застройки города. За 6-7-летний период наблюдений на площадке с естественным растительным покровом отмечалось понижение верхней границы многолетнемерзлых пород с 2 до 6,1 м, несмотря на некоторое понижение среднегодовой температуры воздуха. Как в Игарке, так и в Воркуте деградация верхних горизонтов криолитозоны объясняется возрастанием мощности снегоотложений, так как участки наблюдений оказались на территории расширяющейся городской застройки.

В 70-х гг. под руководством Н.Б.Какунова в Воркутинском районе были развиты стационарные геокриологические исследования, которые успешно продолжаются и в настоящее время. Одним из главных объектов мониторинга криолитозоны является Приполярно-тундровая зональная станция, расположенная в 30 км от

Таблица 3. **Изменение температуры грунтов, Δt, на глубинах 3 и 10 м на Приполярно-тундровой зональной станции***

Геокриологические условия	Среднегодовая температура грунтов, °С	Период наблюдений	Δt, °С	
			3 м	10 м
Сплошная криолитозона	-0,1...-2,5	1970—1990	1,0	0,3
Прерывистая криолитозона (талик)	0,3...1,5	1975—1990	0,7	0,3
Талик под озером	1,5	1978—1990	0,6	0,0
Промерзающий талик (спущенное озеро)	1,3...0,3	1971—1990	-1,3	-1,0

* Материалы наблюдений за температурой грунтов в скважинах по Приполярно-тундровой зональной станции, на основе которых составлена табл.3, а также по другим пунктам геокриологического мониторинга в Воркутинском районе, любезно переданы автору Н.Б.Какуновым.

Воркуты. На этой станции наблюдения за температурой грунтов проводятся на участках со сплошными мерзлыми породами, прерывистыми (несквозные и сквозные талики), в пределах акватории существующего озера и искусственно спущенного. В естественных условиях здесь зафиксировано почти повсеместное повышение температуры грунтов в слое годовых теплооборотов за последние 15—20 лет (табл. 3). Наибольшее повышение температуры, до 3,5—4 °С на глубине 2—3 м приходится на участки сплошной криолитозоны [*Павлов, 1994*]. Наоборот, на участке спущенного озера отмечено общее понижение температуры донных отложений за 18-летний период после сброса. Повышение температуры грунтов характерно также для других объектов мониторинга (режимные участки Роговой, Коротаиха и др.) в арктических районах Европейского северо-востока.

Детальные данные об изменении термического состояния верхних горизонтов криолитозоны в многолетнем цикле получены на стационаре Марре-Сале. В статье использованы данные измерений температуры грунтов в течение 17 лет (1979—1995 гг.), и глубины сезонного протаивания — 18 лет (1978—1995 гг.). Тренд повышений температуры воздуха за рассматриваемый период (по средним скользящим 3-летним значениям) составил 0,11°С/год.

Вариации температуры мерзлых грунтов от года к году даже на глубине 10 м проявляются в большинстве случаев отчетливо и существенно превышают точность инструментальных измерений (0,1 °С). Так, на площадке 36, оборудованной на участке полигональной тундры, изменения температуры грунтов на глубине 10 м (t_{10}) составили за трехлетний период (1981—1984 гг.) около 1 °С (рис.4). Однако для морошково-осоково-сфагнового болота (площадка 34) вариации температуры t_{10} в многолетнем цикле были незначительными. Установление максимальных и минимальных среднегодовых температур воздуха и грунтов не всегда совпадает во времени (см. рис. 4). Это объясняется сильным влиянием снежного покрова на температуру грунтов: многолетние циклы высоты снежного покрова и температуры воздуха не всегда одинаковы. Кроме того, имеется инерционность в теплопередаче от воздуха к грунту.

На фоне многолетних вариаций среднегодовой температуры грунтов в большинстве случаев (площадки 9, 32, 36 и др.) отмечается общая тенденция к ее повышению за период наблюдений. Повышение температуры Δt достигает 2,2 °С на глубине 3 м и 0,8 °С — на глубине 10 м (см. табл. 4). Наибольшее потепление мерзлых грунтов характерно для низкотемпературных полигональных тундровых урочищ, наименьшее — для относительно высокотемпературных урочищ низких пойм и долин рек. Так на урочищах с температурой грунтов ниже -5 °С, ее среднее повышение за 1979—1995 гг. составило на глубине 3 м (Δt_3) 1,3 °С, а на глубине 10 м (Δt_{10}) — 0,7 °С, тогда как на участках с температурой грунтов выше -3 °С значения Δt_3 и Δt_{10} уменьшились до 0,8 °С и 0,3 °С, соответственно. Тренд повышения температуры грунтов на глубине

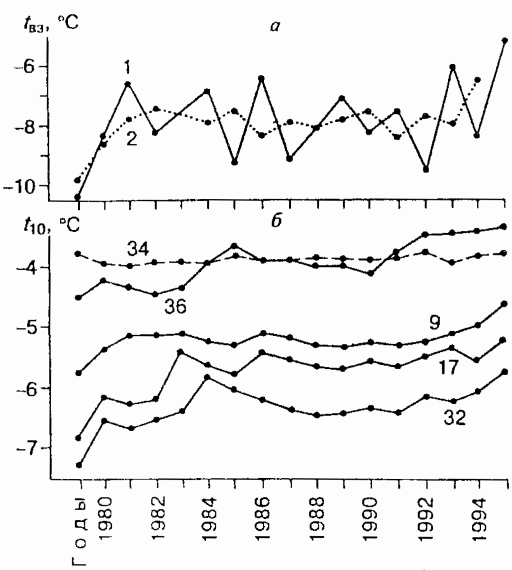

Рис.4. Изменение температуры воздуха (*а*) и температуры грунтов t_{10} (*б*) за 1979—1995 гг. на стационаре Марре-Сале.

1 и 2 — среднегодовые и средние скользящие 3-летние значения $t_{вз}$, соответственно; t_{10} — среднегодовая температура мерзлых грунтов на глубине 10 м.
9, 17, 32,34 и 36 — экспериментальные площадки (см.табл.4).

Таблица 4. **Количественная оценка изменений температуры грунтов за период наблюдений на стационаре Марре-Сале**

Площадка и ее описание	Глубина, м	Средняя многолетняя температура грунтов, °С	Повышение температуры грунтов* за 1979—1995 гг., °С
9 — верхняя часть западного склона; злаки, хвощ с фрагментами ивнячково-зеленомошной растительности; песок (до 0,7 м), суглинок	3 6 10	-5,4 -5,3 -5,2	2,2 1,2 0,8
17 — плоский полигонально-бугристый торфяник с травяно-кустарничково-мохово-лишайниковым покровом; торф (до 0,75 м), лед, песок	3 6 10	-5,6 -5,6 -5,6	1,1 1,0 0,7
32 — полигональная тундра с мохово-лишайниково-травяно-кустарничковым покровом; песок	3 6 10	-6,5 -6,5 -6,4	1,3 1,1 0,6
34 — полоса стока на пологом южном склоне; морошково-осоково-сфагново-гипновое болото; песок, суглинок	3 6 10	-3,6 -3,8 -3,9	0,5 0,2 0,1
36 — днище хасырея с осоково-гипновым болотом; песок, обогащенный торфом	3 6 10	-3,4 -3,8 -3,9	1,1 0,7 0,5
44 — полигональная тундра с кочковатой и мелкобугорковатой поверхностью; растительный покров — травяно-кустарниково-зеленомошно-лишайниковый; песок	3 6 10	-4,2 -4,4 -4,4	1,2 1,0 0,7

* По средним скользящим 3-х летним значениям

Таблица 5. **Статистические характеристики многолетних вариаций глубины сезонного протаивания ($h_т$) на стационаре Марре-Сале**

Площадка	Ландшафтная характеристика	$h_т^{ср}$, м	$\Delta h_т / h_т^{ср}$	σ_h, м	C_v
1	Полигональная тундра с осоково-ивнячково-зеленомошным покрытием	1,13	0,15	0,132	0,11
2	Полигональная тундра с морошково-политрихово-сфагновым покровом	0,83	0,29	0,121	0,145
3	Торфяник, термокарстовая канава; пушицево-осоковый покров	0,75	0,28	0,112	0,149
4	Осоково-гипновое болото	0,65	0,18	0,073	0,112
5	Полигональная тундра с мощным мохово-лишайниковым покровом	0,43	0,21	0,048	0,112
6	Пятно-медальон на участке полигональной тундры	1,23	0,11	0,087	0,071
7	Песчаный раздув на пологом южном склоне полигональной тундры	1,48	0,14	0,124	0,084
8	Пологий южный склон мелкобугорковой тундры	1,26	0,11	0,171	0,136
9	Верхняя часть западного склона; растительный покров представлен злаками, хвощом	1,13	0,11	0,079	0,070

10 м, t_{10}, достигал 0,07 °С/год и составил в среднем по территории стационара 0,03 °С/год.

Приведенные данные убедительно свидетельствуют о повышении температуры грунтов за последние 15—20 лет в регионах, хорошо изученных в стационарном отношении. Оно достаточно выражено даже при отсутствии площадного техногенного воздействия. По результатам ранее выполненного математического моделирования [*Павлов, 1994*] в окрестностях Якутска в результате увеличения высоты снежного покрова в 1955—1980 гг. также отмечено повышение среднегодовой температуры верхнего слоя грунтов в естественных условиях (на поверхности грунтов более чем на 2 °С, а на глубине 3 м — на 1,8 °С). Средняя годовая температура воздуха за этот период практически не изменялась. Т.Ченг и Т.Остеркамп [*Zhang et al., 1993*] на основе реконструкции температурных профилей в глубоких скважинах выявили начавшееся 40—80 лет назад повышение температуры поверхности грунтов (на 2—4 °С) на Аляске, отмечавшееся даже в периоды понижения температуры воздуха. Потепление грунтов они объясняют возрастанием снегоотложений в многолетнем разрезе.

Результаты наблюдений на стационаре Марре-Сале (1978—1995 гг.) позволили выявить изменчивость глубины сезонного протаивания грунтов в многолетнем цикле. Межсезонные вариации глубины сезонного протаивания ($\Delta h_т$) на большей части элементов рельефа превышают 20%. Максимальные вариации $\Delta h_т / h_т^{ср}$ приурочены, как правило, к грунтам органического происхождения. Для более детальной статистической оценки изменений глубины сезонного протаивания по сезонам использовались два параметра — среднеквадратическое отклонение σ_h и коэффициент вариации C_v. Осреднение, выполненное по ряду экспериментальных площадок, дало следующие значения этих параметров: для грунтов органического происхождения (площадки 2—5; $h_т \approx$ 0,4—0,8 м): σ_h = 0,12 м и C_v = = 0,17 (табл. 5). Для грунтов минерального происхождения со слабым надпочвенным покровом (площадки 1,6,7 и 9; $h_т \approx$1,1—1,5 м) параметры σ_h и C_v характеризуются заметно меньшей многолетней изменчивостью: σ_h = 0,09 м, C_v = 0,13.

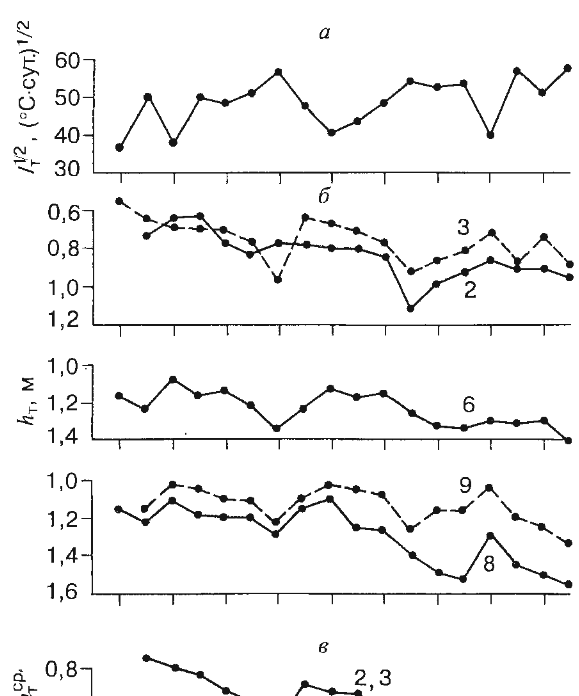

Рис.5. Изменение индекса протаивания $I_т^{1/2}$ (*а*), глубины сезонного протаивания $h_т$ (*б*) и значений $h_т / h_т^{ср}$ (*в*) за 1978—1995 гг. на экспериментальных площадках стационара Марре-Сале.

2,3,6,8 и 9 — экспериментальные площадки (см. табл.5); 2,3 — средние данные по двум площадкам, соответственно; $h_т^{ср}$ — средние значения $h_т$ за 1978—1995 гг.

Абсолютный максимум значений $h_т$ отмечается, естественно, в аномально теплые летние периоды 1989—1991 гг. и 1995 г. В эти годы индекс протаивания $I_т$, измеряемый суммой летних температур воздуха выше 0 °С (°С·дни), был в 1,1—1,3 раза выше „нормы" (среднемноголетнего значения). Минимальные глубины протаивания $h_т$ наблюдались в 1978, 1980 и 1992 гг. при значениях $I_т$ в 1,5—1,6 раза ниже „нормы". Соотношение между значениями $h_т$ в теплые и холодные летние периоды составляет 1,3—1,4 раза для урочищ с достаточно мощным органическим поверхностным слоем и 1,1—1,2 — при его отсутствии.

При аналитическом определении глубины протаивания—промерзания грунта обычно применяют известную формулу Стефана или ее модификации [*Кудрявцев, 1954; Павлов, 1980*]. Во все расчетные формулы промерзания—протаивания входит $I_т^{1/2}$ в качестве основного параметра. В многолетнем ходе отмечается удовлетворительное соответствие между изменениями толщины сезонноталого слоя $h_т$ и $I_т^{1/2}$ (рис. 5).

На фоне значительных межсезонных изменений глубины сезонного протаивания грунта, $h_т$, наблюдается слабая тенденция к ее возрастанию за 1978—1995 гг. Эта тенденция достаточно отчетливо выражена для относительных значений глубины сезонного протаивания $h_т / h_т^{ср}$, где $h_т^{ср}$ — среднее за весь период наблюдений значение $h_т$ (см. рис. 5).

ПРОГНОЗ ОЖИДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ К 2020 И 2050 ГГ.

Прогноз предполагает, что тренды современных изменений термического состояния верхних горизонтов криолитозоны сохранятся на последующие несколько десятилетий. В этом случае ожидаемое региональное повышение температуры грунтов на глубине 10—12 м в условиях сплошной криолитозоны Западной Сибири составит к 2020 г. примерно 1 °С. На повышенных элементах рельефа со сдуваемым снежным покровом температура мерзлых грунтов может возрасти на 1,5 °С и более, а в геоморфологических понижениях — в пределах 0,5 °С. Региональное потепление грунтов на меньших глубинах (до 5 м) и на поверхности возрастет до 1,5—2,5 °С. Возможна некоторая перестройка годового хода температуры грунтов на территории России к 2020 г. Повышение температуры поверхности грунтов в январе составит 3—5 °С, а в июле — не более 2,5 °С. Снижение годовой амплитуды температуры поверхности не превысит 4 °С. Прогнозируемое увеличение глубины сезонного протаивания к 2020 г. не превзойдет 15—25%.

Таким образом, ожидаемое в ближайшие 20—25 лет потепление климата не приведет к коренной перестройке геокриологических условий на большей части территории сплошной криолитозоны России, однако на севере Западной Сибири ее южная граница может переместиться к северу на 50—80 км. В этой субширотной полосе начнется эволюция сплошной криолитозоны в прерывистую. В районах прерывистой и островной криолитозоны повышение t_{10} не превысит 0,5 °С; однако здесь следует ожидать перехода к многолетнему протаиванию криолитозоны сверху.

К 2050 г. прогнозируемое региональное повышение t_{10} в условиях сплошной криолитозоны составит 1,5—2 °С; граница сплошной криолитозоны на территории Западной Сибири может переместиться к Северу примерно на 150—200 км. Возникнет опасность формирования высокотемпературных мерзлых грунтов даже в арктических районах. На большей части территории криолитозоны России будут отмечаться негативные последствия климатического потепления: усиление оттаивания подземных льдов и активизация криогенных геологических процессов (термоабразия, термокарст, оползни-сплывы, наледеобразование); ухудшение прочностных свойств мерзлых грунтовых оснований, появление массовых деформаций и разрушения геосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние годы в России на геокриологических стационарах получены уникальные полевые данные, раскрывающие взаимосвязь между современным климатом и криолитозоной, сформулированы методы оценки динамики криолитозоны, выполнен ряд прогнозных сценариев возможных мерзлотно-климатических изменений в следующем столетии. Проблема изучения эволюции криолитозоны при ожидаемых глобальных изменениях климата стала приоритетной в тематике крупных научно-исследовательских учреждений России. Основные результаты выполненных автором исследований заключаются в следующем.

1. В арктических районах за период метеорологических наблюдений в целом повышение температуры воздуха практически не отмечается. В континентальных районах криолитозоны, наоборот, потепление достаточно четко выражено. За последние три десятилетия происходит почти повсеместное потепление климата на территории криолитозоны России.

2. На станциях мониторинга криолитозоны зафиксировано повышение температуры верхних горизонтов криолитозоны (до 1,2 °С на глубине 6—10 м) за последние 15—25 лет. Оно находится в соответствии в одних случаях — с многолетним повышением температуры воздуха, в других — также с увеличением снегоотложений. Наибольшее потепление мерзлых грунтов приходится на участки сплошной криолитозоны, наименьшее — на талики. Современное повышение температуры мерзлых толщ достигает глубин в десятки метров.

3. Дан прогноз ожидаемых мерзлотно-климатических изменений на севере России в XXI в. На основе экспериментальных данных развит сценарий умеренного потепления климата на севере России в первой половине XXI в. Такое потепление не приведет к существенным изменениям температуры и морфологии сплошной криолитозоны в ближайшие 20—25 лет. Однако к 2050 г. изменения геокриологических условий станут более значительными и возникнет опасность формирования высокотемпературных мерзлых грунтов даже в районах Арктики.

К сожалению, в настоящее время в России стало практически невозможным эффективное ведение мониторинга криолитозоны. Вместе с тем информация по мониторингу криолитозоны России в связи с ожидаемым глобальным потеплением климата имеет существенное значение для изучения эволюции криолитозоны Земли в целом и решения большого числа практических вопросов. Поэтому необходима поддержка со стороны мирового сообщества стран для продолжения функционирования мерзлотно-климатического мониторинга в России.

Одно из важных направлений дальнейших работ по мониторингу криолитозоны — разработка совместно с зарубежными специалистами проекта создания единой системы циркумполярного мониторинга криолитозоны Северного полушария, с использованием унифицированных автоматизированных измерительных средств и компьютерных технологий сбора, хранения и обработки информации. Представляет интерес создание международных геокриологических стационаров на территории России, в первую очередь на Гыдане, Ямале и в Центральной Якутии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен В.А.Дубровину, внесшему значительный вклад в обеспечение функционирования геокриологических стационаров Марре-Сале и Парисенто на севере Западной Сибири. Особой признательности заслуживает Н.Б.Какунов, любезно предоставивший некоторые первичные данные по термическому мониторингу грунтов на Европейском северо-востоке для их систематизации и анализа. Полевые работы финансировались Российской Академией Наук, Геологической службой России и РАО „Газпром“; обобщение данных наблюдений и подготовка статьи осуществлено при содействии ГНТП „Глобальные изменения природной среды и климата“ и Национального Научного Фонда США.

Литература

Аккерман Х.Дж., Бойке Дж., Браун Дж. и др. Программа циркумполярного мониторинга сезонноталого слоя (CALM) // Фундаментальные исследования криосферы земли в Арктике и Субарктике (итоги и перспективы). Тезисы докладов. Пущино, 1996, с. 65—68.

Антропогенные изменения климата / Под ред. М.И.Будыко и Ю.А.Израэля Л., Гидрометеоиздат, 1987, 406 с.

Борисенков Е.П. Изменение климата и человек. М., Знание, 1990.

Будыко М.И. и др. Предстоящие изменения климата //Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1992, № 4, с. 36—52.

Будыко М.И., Израэль Ю.А., Яншин А.Л. Глобальное потепление и его последствия // Метеорол. и гидрол., 1991, № 12, с. 5—10.

Величко А.А., Нечаев В.П. К оценке динамики зоны многолетней мерзлоты в Северной Евразии при глобальном потеплении климата // ДАН, 1992, т. 324, № 3, с. 667—671.

Вильд Г.И. О температуре воздуха в Российской империи. Вып. 2, ч. IV. СПб., 1882, с. 299—359.

Гречищев С.Е., Павлов А.В. Экогеологический мониторинг трассы северного магистрального нефтепровода Норман-Уэлс — Зама (Канада) // Проблемы экологии при освоении газовых и нефтяных месторождений Крайнего Севера. Труды ВНИИГаз. М., 1995, с. 142—145.

Дубровин В.А., Павлов А.В. Сравнительная оценка российских и северо-американских методов ведения мониторинга криолитозоны // Эволюционные геокриологические процессы в арктических регионах и проблемы глобальных изменений природной среды и климата на территории криолитозоны. Пущино, 1995, с. 40.

Изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий верхних горизонтов пород в нефтегазоносных районах криолитозоны (Методическое руководство) / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева, А.В. Павлова. М., Недра, 1992, 288 с.

Кудрявцев В.А. Температура верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР. М., Изд-во АН СССР, 1954, 182 с.

Мельников Е.С., Язвин Л.С., Васильев А.А. Особенности мониторинга геологической среды территорий субъектов Российской Федерации, расположенных в криолитозоне //Материалы Первой конференции геокриологов России, кн. 3. М., МГУ, 1996, с. 317—326.

Мельников П.И., Каменский Р.М., Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны // Вестник РАН, 1993, с. 1090—1095.

Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, Наука, 1979, 284 с.

Павлов А.В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. Новосибирск, Наука, 1980, 240 с.

Павлов А.В. Состояние и направления развития наблюдательной сети геокриологического мониторинга // Рациональное природопользование в криолитозоне. М., Наука, 1992, с. 129—132.

Павлов А.В. Прогноз эволюции криолитозоны в связи с глобальными изменениями современного климата // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и экогеологии. М., ВСЕГИНГЕО, 1994, с. 135—151.

Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Изд. 2-е. М.—Л., Изд. АН СССР, 1937, 372 с.

Температура, криолитозона и радиогенная теплогенерация в земной коре Северной Азии /А.Д. Дучков, В.Т. Балобаев и др. Новосибирск, Наука, 1994, 141 с.

Шполянская Н.А. Попытка прогноза. Знание — сила, 1990, № 5, с. 54—60..

Ячевский Л.А. О вечномерзлой почве в Сибири (с картою) // Изв. Импер. рус. геогр. об-ва, СПб., 1889, т. XXV, вып. 5, с. 341—351.

Brown J. and Andrews I.T. Influence of shortterm Climate fluctuations on permafrost terrain // Carbon Dioxile Effects Research and Assescment Program, Environmental and Societal Conseguences of Pissible CO_2 — Induced Climate Changes. DoE /EV/ partment of Energy, 1982.

Cheng Gudong, Huang Xiaoming and Kang Xingcheng. Recent Permafrost Degradation along the Qinhway // Permafrost, Sixth International Conference. Proceedings (Vol. 2). Beijing, China. South China Univ. of technology Press, 1993, p. 1010—1013.

Lachenbruch A.H., Cladouhos, T.T. and Saltus, R.W. Permafrost Temperature and the Changing Climate // Proc. Fifth Int. on Permafrost. Trondheim, Norway. Tapir, 1988, vol. 3, p. 9—17.

Mackay J.R. Active Layer Change (1968—1993) following the Forest-Tundra file near Inuvik, N.W.T., Canada // Arctic and Alpine Research, 1995, vol. 27, No. 4, p. 323—336.

Manabe S., Wetherald R. On the distribution of Climate Change from an increase in CO_2 content of the atmosphere // J. Atmospheric Sci., 1980, vol. 37, p. 99—118.

Nelson F.E., Anisimov O.A. Permafrost zonation in Russia under antropogenic Climate Change // PPP, 1993, vol. 4, p. 137—148.

Nelson F.E., Lachenbruch A.H., Woo M.-K et al. Permafrost and Changing Climate // Permafrost, Sixth Int. conf. Proceedings (vol. 2). Beijing, China. South China Univ. of technology Press. 1993, p. 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, Pushcino, 1992, p. 168—173.

Pavlov A.V. Current Changes of Climate and Permafrost in the Arctic and Sub-Arctic of Russia// PPP. 1994, vol. 5, p. 101—110.

Romanovsky V.E., Osterkamp T.E. (1995). Interannual Variations of the Termal Regime of the Active Layer and Near-Surface Permafrost in Northern Alaska // PPP, vol. 6, No. 4, p. 313—335..

Vyalov S.S., Gerasimov, Zolotar A.I. and Fotiev S.M. Ensuring structure stability and durability in Permafrost ground areas at Global Warming of the Earths Climate // Permafrost, sixth Int. conf. Proceedings (vol. 1). Beijing, China. South Chine Univ. of technology Press., 1993, p. 955—960.

Zhang T., Osterkamp T.W. Changing Climate and Permafrost Temperatures in the Alaskan Arctic. Permafrost, Sixth Int. Conf.Proceedings (vol. 1). Beijing, China. South China Univ. of technology Press., 1993, p. 783—788.

Поступила в редакцию
7 января 1997 г.