

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ ЭВОЛЮЦИИ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

С.П. Малевский-Малевиц, Е.К. Молькентин, Е.Д. Надежина, Т.В. Павлова, А.А. Семиошина

*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова,
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7, Россия, rsb@main.mgo.rssi.ru*

Выполнен анализ эволюции глубин сезонного протаивания и сезонного промерзания в XX–XXI вв. под влиянием изменения климата. Используются данные о климате, полученные с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Расчетные характеристики сравнивались с систематизированными и опубликованными данными наблюдений на метеорологических станциях и геокриологических стационарах России. Выполнено осреднение глубин протаивания и промерзания по территории двух больших регионов России, которые различаются наличием или отсутствием вечной мерзлоты в слое 0–3,2 м. Использование климатических данных, рассчитанных по модели HadCM3, позволяет удовлетворительно воспроизвести экспериментальную эволюцию глубин протаивания и промерзания за период с 1956 по 1990 г. Данные локального мониторинга глубин сезонного протаивания воспроизводятся моделями не для всех регионов России. Антропогенное потепление становится статистически значимым по сравнению с естественной изменчивостью глубин протаивания со второй половины XXI в. Выполнены также оценки деформации годовой эволюции профилей температуры в слое 0–30 м в XXI в.

Вечная мерзлота, климат, эволюция, прогноз, глубины протаивания и промерзания

MODELING AND ANALYSIS OF OPPORTUNITIES FOR THE EXPERIMENTAL CONTROL OF THE EVOLUTION OF PERMAFROST THERMAL CONDITIONS

S.P. Malevsky-Malevich, E.K. Molkentin, E.D. Nadyozhina, T.V. Pavlova, A.A. Semioshina

*Voeikov Main Geophysical Observatory,
194021, St. Petersburg, Karbyshev str., 7, Russia, rsb@main.mgo.rssi.ru*

Analysis of the evolution of season thawing and freezing depths during the XX and XXI centuries under the climate change is performed. The climate data are simulated by means of the Global Climate Models (GCM). The calculated characteristics are compared with the summarized and published data of observations. The regionally averaged values of freeze/thaw depths are calculated for two vast regions of Russia. The difference between the regions is determined as the presence or absence of permafrost in the 0–3.2 m soil layer. The climate data simulated by means of HadCM3 give the opportunity to reproduce the observed evolution of thaw/freezing depths for the period of 1956–1990. The models can reproduce local monitoring data of seasonal thaw depth not for all regions of Russia. The anthropogenic effects in the evolution of the thawing depth are statistically significant from the second half of the XXI century. The annual evolution of temperature profile changes during the XXI century in the layer of 0–30 m is also simulated.

Permafrost, climate, evolution, forecast, thawing and freezing depths

ВВЕДЕНИЕ

Исследования эволюции многолетнемерзлых грунтов под влиянием климатического воздействия приобретают особое значение в связи с проблемой предвычисления параметров вечной мерзлоты в XXI в. Анализ изменения параметров вечной мерзлоты необходим для определения стратегии адаптации к изменившимся условиям окружающей среды. Очевидно, что решение такой задачи прежде всего требует анализа прогностических значений климатических характеристик. В качестве инструмента для прогноза изменений климата широко используются решения систе-

мы гидротермодинамических уравнений, описывающих состояние атмосферы в разные моменты времени.

Вечная мерзлота является климатически уязвимым элементом природной среды. Исследованиям деградации и устойчивости вечной мерзлоты в условиях изменяющегося климата посвящены многочисленные публикации [Анисимов, 1990; Анисимов, Нельсон, 1997; Изразль и др., 1999; Павлов, 2000, 2003; Малевский-Малевиц и др., 2000; Молькентин и др., 2001; Allard et al., 1995; Anisimov et al., 1997; Pavlov, 1997; Osterkamp, Romanovsky, 1999;

Malevsky-Malevich et al., 2001; Romanovsky, Osterkamp, 2001; Oberman, Mashitova, 2001; Sazonova et al., 2004]. К ним относятся и исследования, основанные на тех представлениях об изменении климата, которые получены с использованием моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО).

Оценка эволюции теплового состояния многолетнемерзлых грунтов по климатическим характеристикам, определенным на основе МОЦАО, неоднократно разными способами проводилась в последние годы [Анисимов, Нельсон, 1997; Anisimov et al., 1997; Malevsky-Malevich et al., 2001; Zhuang et al., 2001]. Во всех этих работах состояние грунтов и характеристики растительного и снежного покрова были заранее установлены. При любом варианте расчета теплового состояния грунтов по атмосферным климатическим характеристикам существует целый ряд трудностей в интерпретации модельных оценок, связанных с неполным соответствием рассчитываемых и измеряемых параметров. Для преодоления этих трудностей потребуется тщательный анализ и дополнительные разработки. В настоящей работе мы пытаемся систематизировать некоторые результаты, полученные при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных об эволюции теплового состояния грунтов.

1. Методическая основа расчетов теплового режима грунтов. Основой для расчета распределений температуры в грунтах являлось численное решение одномерного уравнения теплопроводности в многослойной расчетной области, верхняя граница которой совпадает с верхней границей растительного или снежного покрова, а нижняя граница находится на глубине 30 м. На верхней границе расчетной области задана температура покрова, на нижней – геотермальный поток тепла. Толщина слоя растительности и теплофизические характеристики этого слоя считаются известными. Толщина снежного покрова и температура поверхности задаются с учетом их изменений от месяца к месяцу. В области фазовых переходов вводится эффективная теплоемкость среды. Теплофизические характеристики, являющиеся коэффициентами уравнения теплопроводности, заданы в зависимости от состава и влажности грунтов. Решение уравнения отыскивается методом прогонки в узлах регулярной одноградусной сетки, покрывающей поверхность исследуемого региона. Использована неявная численная схема с суточным временным шагом. Схема реализована на переменной вертикальной сетке с шагом 0,1 см вблизи поверхности. Общее число точек по вертикали равно 60. Более подробное описание схемы расчета приведено в [Malevsky-Malevich et al., 2001; Малевский-Малевич и др., 2005]. Схема решения дискретных уравнений является устойчивой, установившийся режим в слое 0–30 м достигается в течение 45–50 лет.

Отметим еще раз, что входными параметрами схемы, позволяющей рассчитывать вертикальное распределение температуры в грунтах, являются температура поверхности покрова и толщина снежного покрова. Последние получены в виде базы расчетных данных нескольких МОЦАО, включающей среднемесячные значения температуры поверхности и водный эквивалент месячных сумм осадков. При выполнении расчетов плотность снежного покрова и его теплопроводность считаются неизменными на протяжении всего периода с момента появления покрова до его исчезновения. Принятые в расчетах значения этих характеристик соответствуют средним условиям. В базе данных МОЦАО нового поколения имеются необходимые для расчета температуры грунтов характеристики за все годы XX и XXI вв. Воспользуемся рекомендациями и определением сценариев изменения климата, которые даны Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) [IPCC, 2001]. Как показано в ряде исследований, при использовании ансамбля из шести МОЦАО (CGCM2 (Канада), CSIRO_Mk2 (Австралия), CSM 1.4 (NCAR, США), ECHAM4/OPYC3 (Германия), GFDL_R30_c (GFDL, США), HadCM3 (Великобритания)), более подробно описанных в [Мелешко и др., 2004], а также привлечении умеренного сценария эмиссии углекислого газа и аэрозоля (B2) не происходит экстремальных климатических воздействий на криосферу. В нашем случае, говоря об импактных оценках, мы имеем в виду оценки термического состояния и глубин протаивания–промерзания грунтов. Успешность расчетов современного климата по ансамблю моделей является фактом, подтвержденным при оценках осредненных по пространству климатических характеристик. Однако не все климатические характеристики рассчитываются на основе ансамблевого подхода более успешно по сравнению с результатами, получаемыми на основе отдельных моделей. Точность модельных оценок термической эволюции криосферы под влиянием климата изучена недостаточно.

2. Расчетные значения характеристик, осредненных по площади, и сравнение их с данными наблюдений. Наиболее изучаемой и достаточно востребованной для практических целей характеристикой в регионах, занимаемых вечной мерзлотой, является глубина сезонного протаивания. Большая изменчивость в пространстве (мозаичность) глубин сезонного протаивания создает трудности при обобщении экспериментальных данных на значительных территориях. На некоторых метеорологических станциях наблюдения за тепловым состоянием грунтов проводились на протяжении XX в., но ряды этих наблюдений весьма неоднородны и плохо сопоставимы. Ограничен-

ные возможности использования данных по температуре почвы, измеренной с помощью вытяжных термометров, хорошо известны [Павлов, 1975]. Развитие моделей, однако, не может осуществляться без привлечения данных натуральных наблюдений, и поэтому возникает необходимость использовать для проверки модельных расчетов всю имеющуюся информацию. Разумеется, следует отдавать себе отчет, что получаемые выводы являются приближенными. В настоящее время предприняты попытки обобщения данных стандартных наблюдений за температурой почвы в слое 0–3,2 м на метеостанциях России [Frauenfeld et al., 2004]. Авторы использовали ряды наблюдений, проводившихся в России, с 1930 по 1990 г. В этой статье выполнен статистический анализ двух больших массивов данных, разделенных по принципу наличия сезонного протаивания в районах вечной мерзлоты или, наоборот, сезонного промерзания в районах, которые характеризуются отсутствием вечной мерзлоты в верхнем 3-метровом слое почвы. Подробное описание методики обработки данных наблюдений по вытяжным термометрам на метеорологических станциях приводится в [Frauenfeld et al., 2004]. Заметим, что в указанной работе для большинства пунктов наблюдения анализируется положение уровня перехода температуры через 0 °С. Отыскание этого уровня требует интерполяции данных наблюдений. Эта же характеристика рассчитывается по профилям температуры при моделировании. Следует также отметить, что обобщение данных на основе только такого принципа, как наличие или отсутствие режима протаивания, позволяет нивелировать погрешности, связанные с различием грунтов, ландшафтов и других причин, сохраняющих стабильность (или, во всяком случае, достаточно инерционных по сравнению с положением нулевой изотермы в грунте) при изменении климата. При этом, однако, невозможно исследовать особенности реакции верхнего слоя почвы на климатические изменения в зависимости от того, расположен ли пункт наблюдения в зоне сплошной, прерывистой или островной вечной мерзлоты.

Имея модельные распределения температуры в узлах регулярной сетки, получаем возможность сравнить наблюдаемое и модельное изменение глубин сезонного протаивания (h) и глубин сезонного промерзания (h_1) в конце XX в., осреднив эти характеристики по регионам, которые характеризуются режимами сезонного промерзания и сезонного протаивания соответственно. Выбор региона, по которому выполнено пространственное осреднение, сделан на основе предположений, соответствующих анализу экспериментальных данных по температуре грунтов в слое 0–3,2 м. А именно, полная база данных по температуре была разбита авторами статьи [Frauenfeld et al., 2004] на два мас-

сива в зависимости от температуры на глубине 3,2 м. Если для всего ряда данных в том или ином пункте наблюдения температура на уровне 3,2 м оставалась отрицательной и в теплое время года, и в холодный сезон, то считалось, что данный пункт относится к зоне вечной мерзлоты и характеризуется режимом протаивания. Остальные пункты наблюдения считались принадлежащими регионам, для которых характерен режим сезонного промерзания. Всего в зоне сезонного протаивания были использованы данные 31 пункта наблюдений, а в регионе сезонного промерзания – 211 пунктов. Очевидно, что разный объем данных в регионах не позволяет проводить достаточно корректное сравнение результатов, полученных для различных регионов.

Таким же образом были проанализированы модельные значения температуры на глубине 3,2 м в узлах одноградусной регулярной сетки. Модельные оценки позволяют провести пространственную границу $X(t)$ между регионами, характеризующимися режимом сезонного протаивания и режимом сезонного промерзания. Для разных видов грунтов модельная граница занимает разное положение и, кроме того, сдвигается к северу при потеплении климата. Следовательно, положение границы зависит от времени t , в течение которого многолетнемерзлые грунты испытывают климатическое воздействие одного направления. На рис. 1 показано модельное положение границы $X(t)$ для суглинков в конце XX в. и смещение границы, а также отмечены метеорологические станции, характеризующиеся режимом промерзания и протаивания. Для иллюстрации мы повторили анализ

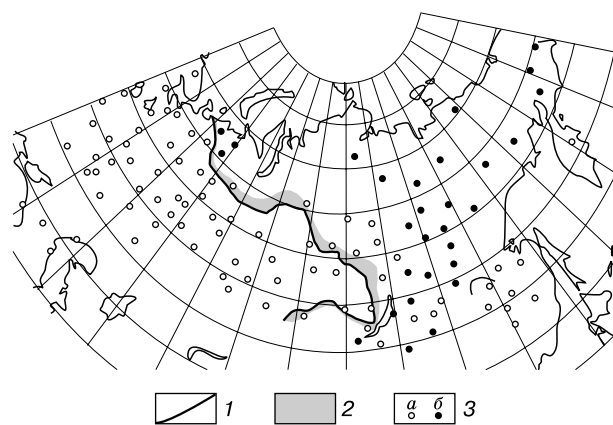


Рис. 1. Модельная граница (1) между регионами, характеризующимися режимом сезонного протаивания и режимом сезонного промерзания.

Заштрихованная область (2) показывает изменение положения границы за период с конца XX до конца XXI в. Точками (3) отмечены метеорологические станции (а – метеостанции, которые характеризуются в основном режимом сезонного промерзания; б – метеостанции, на которых в слое 3,2 м наблюдается сезонное протаивание).

данных по температуре почвы на метеорологических станциях, который был проведен в работе [Frauenfeld et al., 2004]. Результат нашего анализа отличается в деталях от анализа, приведенного в статье [Frauenfeld et al., 2004], особенно для тех метеостанций, которые размещены в переходной зоне от режима протаивания к режиму промерзания. Наличие различий неудивительно, так как было использовано разное число станций, и проявление субъективного подхода при анализе неполных данных неизбежно. Ежегодное модельное смещение границы $X(t)$ невелико, и влияние этого смещения на статистические характеристики массива на протяжении XX в. также незначительно. Однако мы исключали из осреднения по региону, отнесенному к зоне вечной мерзлоты или к области режима сезонного промерзания, те узлы регулярной сетки, которые удалены от рассматриваемой границы менее чем на 1° . На положение границы $X(t)$ оказывает влияние состав почвы и ее влажность. Граница $X(t)$ для песчаных грунтов, например, проходит в конце XX в. севернее, чем это показано на рис. 1, и для каждого вида грунтов можно провести отдельное осреднение по регионам, которые соответствуют наличию или отсутствию режима сезонного протаивания. Дальнейшее развитие работы предполагает анализ влияния типа грунтов на расчеты. На рис. 1 видно, что соответствие положения границы $X(t)$ реальным регионам с разными режимами сезонной смены температур может быть выполнено лишь

приблизительно. Смещение границы несколько меняет объем массивов данных, характеризующихся разными режимами, увеличивая в XXI в. массив данных, относящихся к режиму сезонного промерзания. Более того, площади регионов, по которым выполняется осреднение, не совпадают и вследствие выбранного условия разграничения регионов.

Обратимся к результатам сравнения наблюдаемых и модельных данных по глубинам сезонного протаивания и сезонного промерзания. На рис. 2 приведены результаты такого сравнения с использованием расчетных данных климатической модели HadCM3. Используются приведенные в статье [Frauenfeld et al., 2004] данные по отклонениям глубин сезонного протаивания (h) и глубин сезонного промерзания (h_1) от средних значений (соответственно h_{cp} и h_{1cp}) за период с 1930 по 1990 г. Однако, имея в виду ограниченный объем экспериментальных данных до 1950 г., мы привели на рисунке только данные после 1950 г. Очевидно, что расчетные и экспериментальные линейные тренды как для глубин сезонного протаивания, так и для глубин сезонного промерзания совпадают. Для того чтобы узнать, имеет ли место это совпадение в случае использования расчетных данных других климатических моделей, требуется дополнительный анализ. На рис. 2 приведены также расчетные данные для XXI в. На рисунке видно, что модельный расчет, соответствующий сценарию эмиссии B2, с учетом межгодовой изменчивости практически совпадает с данными линейной экстраполяции современных трендов. Этот результат следует проверить на основе прогностических данных других МОЦАО.

3. Расчетные значения локальных характеристик и данные мониторинга. Подробная инвентаризация данных мониторинга термического состояния многолетнемерзлых грунтов, выполненная в работе [Павлов, Малкова, 2005], дает возможность ориентироваться в современных массивах данных и проводить анализ на основе наиболее полной информации. Как отмечено в этой работе, для большинства объектов мониторинга характерна недостаточная изученность больших глубин. Там же [с. 76] указано, что “в комплексе работ по мониторингу преобладают наблюдения за глубиной сезонного протаивания и температурой мерзлых грунтов”. Разумеется, прежде всего привлекают внимание долгопериодные ряды наблюдений за глубиной сезонного протаивания, которые проводятся на целом ряде геокриологических стационаров. Данные мониторинга глубин сезонного протаивания неоднократно анализировались [Израэль и др., 1999; Павлов и др., 2002, 2004; Павлов, 2003; Allard et al., 1995; Brown et al., 2000; Romanovsky, Osterkamp, 2001; Pavlov, Moskalenko, 2002], особенно подробный анализ выполнен для регионов За-

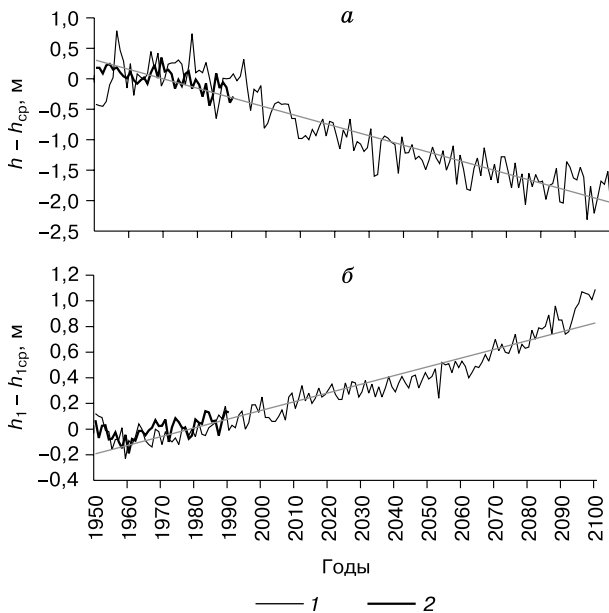


Рис. 2. Осредненная по региону эволюция глубин сезонного протаивания (а) и сезонного промерзания (б):

1 – расчет по модели, 2 – данные [Frauenfeld et al., 2004].

падной Сибири. Результаты этого анализа убедительно показывают, что в конце XX в. в Западной Сибири происходит повышение температуры многолетнемерзлых грунтов и наблюдается слабое увеличение глубин сезонного протаивания. Расчетные значения тренда глубин сезонного протаивания в Западной Сибири, полученные в результате осреднения по шести климатическим моделям, перечисленным выше, близки к значениям линейного тренда, построенного по данным мониторинга [Малевский-Малевич и др., 2005].

В недавней работе [Павлов и др., 2004] обращается внимание на то, что на ряде объектов мониторинга в Якутии в конце XX в. получен противоположный результат, т. е. наблюдается уменьшение глубин сезонного протаивания. Проведем сравнительный анализ данных мониторинга в Западной Сибири и в Якутии и соответствующих модельных расчетов. Будем сравнивать отклонения глубин протаивания (h) от среднего климатического значения (h_{cp}) для регионов Западной Сибири и Якутии. Используются скользящие средние за трехлетний период данные мониторинга, опубликованные в работе [Павлов и др., 2004]. Отклонения глубин протаивания от среднего климатического значения, рассчитанные на основе натурных и численных экспериментов, приведены на рис. 3. На рисунке представлены осредненные данные по ансамблю из шести моделей, по одной из моделей (CSM) и данные натурных наблюдений. Следует отметить, что направление тренда эволюции глубин протаивания преимущественно определяется на данном временном интервале выбросом значений противоположного знака в период с 1971 по 1973 г. Выбросы значений ($h - h_{cp}$) в этот период находятся вне доверительного интервала и являются статистически значимыми. Однако длина ряда данных не позволяет сделать окончательный вывод по поводу того, является ли этот выброс следствием ритмического колебания или проявлением антропогенного воздействия на климат. Проведем анализ модельной эволюции глубин протаивания за эти годы. Только одна модель из ансамбля (см. рис. 3,б) более или менее адекватно воспроизводит межгодовую изменчивость ($h - h_{cp}$) для выбранного временного интервала. Скорее всего, этот результат является случайным. Очевидно, что осредненные ансамблевые данные отражают главным образом антропогенное воздействие на климат (см. рис. 3,в), проявляющееся в виде однонаправленного сигнала, а сглаженные межгодовые колебания ни в коей мере не отражают естественных колебаний. Напомним, что модельные значения глубин протаивания, приведенные на рис. 3,в, соответствуют осредненным климатическим параметрам и не могут быть полностью адекватны натурным наблюдениям в одной точке.

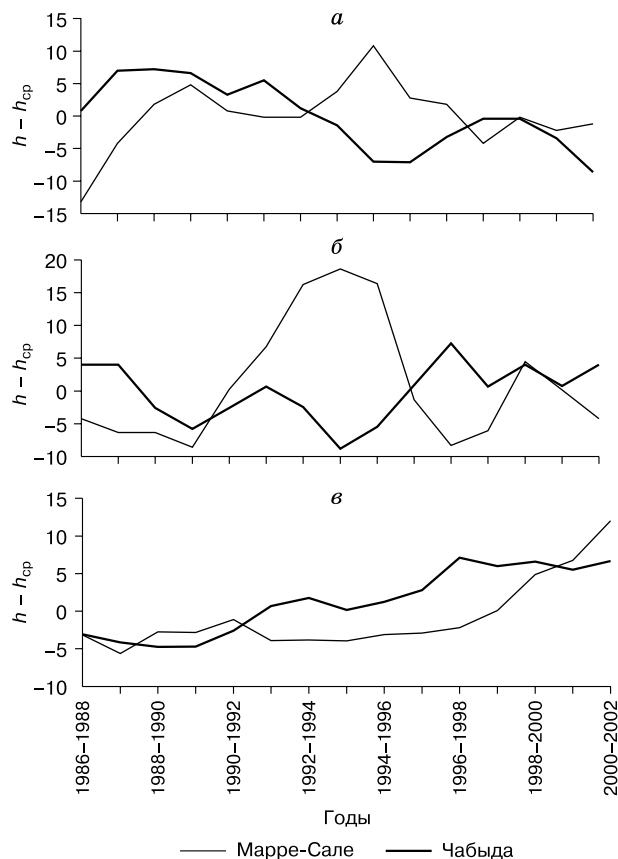


Рис. 3. Эволюция отклонений глубин сезонного протаивания от среднего значения на стационарах Марре-Сале и Чабыда:

a – сглаженные трехлетние средние по данным [Павлов и др., 2004], *б* – расчет по модели CSM, *в* – осредненные данные по шести моделям.

4. Прогностические оценки и их достоверность. Мы видели, что возможности валидации модельных расчетов являются довольно ограниченными. Тем не менее имеются некоторые основания для выполнения оценок эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов в XXI в. Эти основания не являются только следствием сравнения модельных оценок с экспериментальными данными. Численные эксперименты с ансамблем моделей обеспечивают вариабельность расчетов и создают основу для статистического анализа расчетных характеристик.

Прежде всего оценим, насколько значимым по отношению к естественной изменчивости термического состояния грунта является воздействие современного модельного потепления, связанного с эмиссией CO_2 и аэрозоля. В таблице приведены отношения величины изменений глубин протаивания в регионе Западной Сибири (в окрестности геокриологического стационара Марре-Сале) к величине межгодовой дисперсии ($\sigma_{эксп}$), вычислен-

**Характеристики изменений
глубин протаивания в регионе Западная Сибирь
(стационар Марре-Сале)**

Периоды осреднения	$\sigma_{\text{эксп}}$	$\sigma_{\text{мод}}$	$\delta h_{\text{мод}}$	Δh	
				$\sigma_{\text{эксп}} + \delta h_{\text{мод}}$	$\sigma_{\text{эксп}} + \sigma_{\text{мод}}$
1981–2000	9,1	6,3	32,0	–	–
2011–2030	9,1	10,2	36,1	0,6	1,1
2041–2060	9,1	8,2	47,0	0,9	2,5
2081–2100	9,1	13,9	64,7	1,3	3,4

Примечание. $\sigma_{\text{эксп}}$ – естественная межгодовая изменчивость; $\sigma_{\text{мод}}$ – модельная изменчивость; $\delta h_{\text{мод}}$ – средняя разность значений между процентилями 12,5 и 87,5 за соответствующий период времени; Δh – изменение средних за 20-летний период глубин протаивания по отношению к базовому периоду (1981–2000).

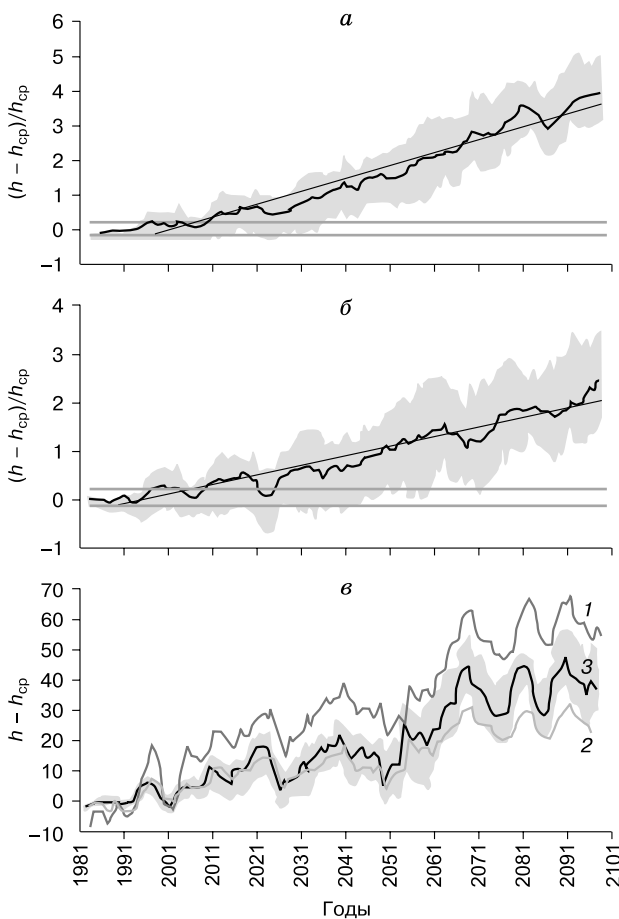


Рис. 4. Эволюция отклонений глубин протаивания от среднего значения для суглинка в Западной Сибири (а) и Якутии (б) и для разных грунтов в Западной Сибири (в).

1 – песок; 2 – торфяник; 3 – суглинок. Заштрихованная область показывает разброс данных, связанный с различием моделей.

ной по экспериментальным данным, приведенным в работе [Павлов, 2000], и к величинам ($\sigma_{\text{мод}}$ и $\delta h_{\text{мод}}$), определяющим разброс расчетных значений, полученных по разным моделям. Из таблицы видно, что к концу XXI в. детерминированное изменение глубины протаивания оказывается существенно больше естественной межгодовой дисперсии и разброса данных, вычисленного как разность процентилей 12,5 и 87,5 по ансамблю моделей для соответствующего временного периода. В начале века величины этих характеристик вполне сопоставимы, так что неопределенность расчетных глубин протаивания весьма велика.

Иллюстрацией временной эволюции осредненных по ансамблю моделей глубин протаивания для регионов Западной Сибири и Якутии являются рис. 4, а, б. На этих рисунках приведены безразмерные отклонения глубин протаивания от среднего значения за базовый период. Разброс модельных оценок характеризует область, в которую попадает 75 % модельных значений (разность между процентилями 12,5 и 87,5). Две прямые, параллельные оси абсцисс, обозначают границы доверительного интервала естественной изменчивости, в который должны попадать 95 % модельных значений при сохранении статистической структуры модельного базового климата. Если кривая выходит за границы этого интервала, то рассматриваемые изменения статистически значимы. В районах Западной Сибири изменения глубин протаивания статистически значимы начиная с 40-х гг., а в Якутии – с 70-х гг. XXI в. Несмотря на существенный разброс расчетных глубин протаивания, вызванный различием климатических моделей, в течение всего XXI в. он не превосходит разброса, обусловленного различиями типов грунтов (см. рис. 4, в).

Значительный интерес представляет исследование сценариев возможного изменения температуры грунтов на глубинах, превышающих глубину сезонного протаивания. В качестве примера таких изменений на рис. 5 показана годовая эволюция поля температуры в слое (0–20 м), осредненная по ансамблю моделей для конца XX и XXI вв. Расчетный пример относится к пространственной области, расположенной вблизи южной границы зоны сплошной вечной мерзлоты в Западной Сибири и в Центральной Якутии. На рис. 5 видно, что повышение температуры в Западной Сибири проникает до значительных глубин и приводит к отрыву сезоннопромерзающего слоя от толщи реликтовых многолетнемерзлых пород. В регионе Якутии для тех же грунтов наблюдается повышение температуры во всем рассматриваемом слое, однако отрыва сезоннопромерзающего слоя в данном регионе не происходит.

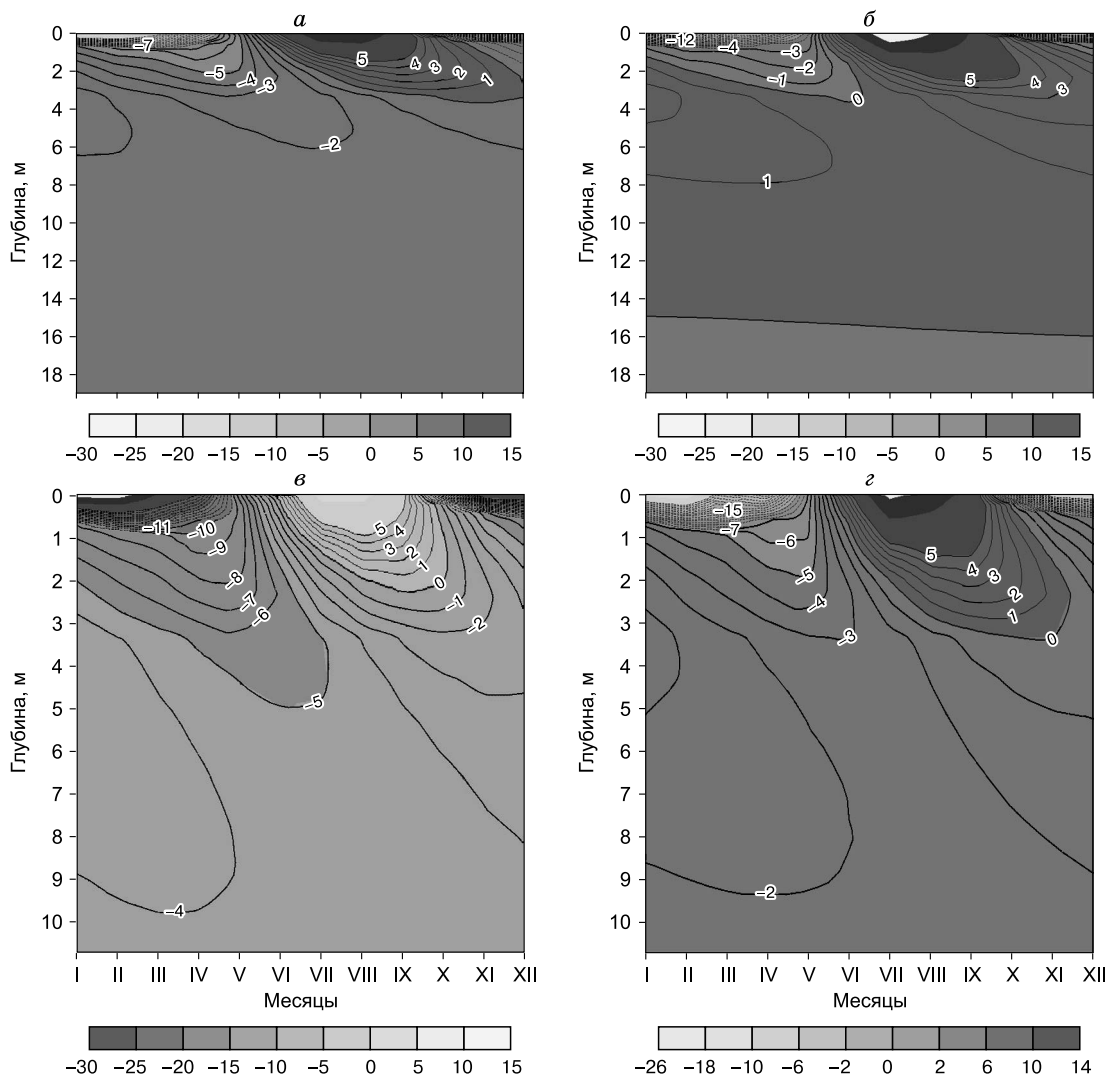


Рис. 5. Годовая эволюция температур на разных глубинах в конце XX в. (а, в) и в конце XXI в. (б, г): а, б – Западная Сибирь; в, г – Якутия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модельные оценки позволяют проследить за динамикой температурного поля в грунтах и динамикой деятельного слоя на протяжении XX столетия, а также построить сценарии этой динамики в XXI в. На примере использования климатических данных одной из наиболее популярных МОЦАО (HadCM3) показано удовлетворительное согласие модельных и наблюдаемых в XX в. изменений глубин деятельного слоя как при сезонном протаивании, так и при сезонном промерзании. Проведенный анализ не является исчерпывающим. Он лишь показывает, что однозначное решение проблемы деградации вечной мерзлоты в XXI в. на основе только глобальных моделей климата в настоящий

момент невозможно. Оценка вероятности возникающей угрозы заметного повышения температуры многолетнемерзлых пород затруднена целым рядом ограничений, связанных с отсутствием надежной методологии использования экспериментальных данных для валидации модельных оценок. Степень согласованности расчетных и модельных характеристик зависит как от успешности воспроизведения климатических параметров и учета характерных ландшафтных признаков изучаемого региона, так и от особенностей анализа экспериментальных данных.

Развитие исследований должно предусматривать как совершенствование моделей климата, так и расширение экспериментальной базы данных. Необходимо иметь в виду, что для оценки регио-

нальных проявлений глобальных изменений климата могут быть использованы региональные климатические модели, в которых учтена специфика изучаемого региона. Для анализа должны быть привлечены наблюдения за температурой грунтов в скважинах. Развитие исследований должно предусматривать анализ разномасштабной изменчивости атмосферных климатических характеристик и, соответственно, характеристик криолитозоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 03-05-64955, 06-05-64969).

Литература

- Анисимов О.А.** Оценка влияния ожидаемых изменений климата на режим вечной мерзлоты // *Метеорология и гидрология*, 1990, № 3, с. 40–46.
- Анисимов О.А., Нельсон Ф.Е.** Влияние изменения климата на вечную мерзлоту в Северном полушарии // *Метеорология и гидрология*, 1997, № 5, с. 71–80.
- Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А.** Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных регионах России // *Метеорология и гидрология*, 1999, № 1, с. 18–26.
- Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д. и др.** Модельные расчеты мощности толщ многолетнемерзлых пород и глубины сезонного протаивания суглинков при современном климате // *Криосфера Земли*, 2000, т. IV, № 4, с. 49–56.
- Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Павлова Т.В.** Модельные оценки изменений температуры воздуха и эволюция теплового состояния многолетнемерзлых пород // *Криосфера Земли*, 2005, т. IX, № 3, с. 36–44.
- Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А. и др.** Возможные антропогенные изменения климата в России в 21 веке: оценки по ансамблю климатических моделей // *Метеорология и гидрология*, 2004, № 4, с. 38–48.
- Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Шкляревич О.Б.** Пространственная изменчивость модельных характеристик многолетнемерзлых грунтов // *Метеорология и гидрология*, 2001, № 8, с. 89–97.
- Павлов А.В.** Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, Кн. изд-во, 1975, 302 с.
- Павлов А.В.** Теплоперенос в природных комплексах Севера России // *Криосфера Земли*, 2000, т. IV, № 4, с. 22–31.
- Павлов А.В.** Мерзлотно-климатические изменения на Севере России: наблюдения и прогноз // *Изв. РАН. Сер. геогр.*, 2003, № 6, с. 42–50.
- Павлов А.В., Ананьева Г.В., Дроздов Д.С. и др.** Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на Севере России // *Криосфера Земли*, 2002, т. VI, № 4, с. 30–39.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.** Инвентаризация наблюдательных сетей мониторинга криолитозоны в России // *Криосфера Земли*, 2005, т. IX, № 2, с. 67–77.
- Павлов А.В., Скачков Ю.Б., Какунов Н.Б.** Взаимосвязь между многолетними изменениями глубины сезонного протаивания грунтов и метеорологическими факторами // *Криосфера Земли*, 2004, т. VIII, № 4, с. 3–11.
- Allard M., Wang B., Pilon J.A.** Recent cooling along the southern shore of Hudson Strait Quebec, Canada, documented from permafrost temperature measurements // *Arctic and Alpine Res.*, 1995, vol. 27, p. 157–166.
- Anisimov O.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E.** Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models // *Global and Planet. Change*, 1997, vol. 15, p. 61–78.
- Brown J., Burgess M., Pavlov A. et al.** The global terrestrial network for permafrost // *Rhythms of natural processes in Earth cryosphere*, Pushchino, 2000, p. 203–204.
- Frauenfeld O.W., Zhang T., Barry R.G., Gilichinsky D.** Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depth in Russia // *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, No. D05101, doi: 10.1029/2003JD004245.
- IPCC, 2001:** Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change / J.T. Houghton, Y. Ding (eds.). Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2001, 881 p.
- Malevsky-Malevich S.P., Molkentin E.K., Nadyozhina E.D., Shklyarevich O.B.** Numerical simulation of permafrost parameters distribution // *Cold Regions Sci. and Technol.*, 2001, No. 32, p. 1–11.
- Oberman N.G., Mashitova G.G.** Permafrost dynamics in the north-east of European Russia at the end of 20th century // *Norwegian J. Geogr.*, 2001, vol. 55, p. 241–244.
- Osterkamp T.E., Romanovsky V.E.** Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1999, vol. 10, p. 17–37.
- Pavlov A.V.** Permafrost-climatic monitoring in Russia: methodology, observation results, and forecasting // *Earth's Cryosphere*, 1997, vol. 1, No. 1, p. 47–58.
- Pavlov A.V., Moskalenko N.G.** The thermal regime of soils in the North and Western Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, vol. 13, p. 43–51.
- Romanovsky V.E., Osterkamp T.E.** Permafrost: changes and impacts // *Permafrost response on economic development, environmental security and natural resources*. Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 2001, p. 297–315.
- Sazonova T.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Sergeev D.O.** Permafrost dynamics in the 20th and 21st centuries along the East Siberian transect // *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, No. D01108, doi: 10.1029/2003JD003680.
- Zhuang Q., Romanovsky V.E., McGuire A.D.** Incorporation of a permafrost model into a large-scale ecosystem model: Evaluation of temporal and spatial scaling issues in simulating soil thermal dynamics // *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, No. D24, p. 33649–33670.

Поступила в редакцию
3 апреля 2006 г.