

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.581

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МОЩНОСТИ СЕЗОННОТАЛОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ
СОВРЕМЕННОГО И БУДУЩЕГО КЛИМАТА

О.А. Анисимов

*Государственный гидрологический институт,
199053, С.-Петербург, 2-я Линия В.О., 23, Россия, oleg@oa7661.spb.edu*

Разработан метод моделирования вечной мерзлоты, основанный на расчете ансамбля состояний многолетнемерзлых грунтов с учетом пространственной изменчивости свойств снежного покрова, растительности и почвы. Рассчитанные с его помощью значения мощности сезонноталого слоя хорошо согласуются с данными наблюдений на ряде площадок в различных регионах Севера России. Метод применяется для вероятностно-статистического прогноза изменения мощности сезонноталого слоя в условиях прогнозируемого на середину XXI в. климата.

Моделирование, сезонноталый слой, изменчивость, ансамблевое осреднение, вероятностно-статистический прогноз

STOCHASTIC MODELLING OF THE ACTIVE LAYER THICKNESS
UNDER CONDITIONS OF THE CURRENT AND FUTURE CLIMATE

O.A. Anisimov

State Hydrological Institute, 199053, St. Petersburg, Second Line V.O., 23, Russia, oleg@oa7661.spb.edu

We have developed a new method of stochastic permafrost modelling, which is based on the ensemble approach. The method accounts for the spatial variability of the snow cover, vegetation and soil. The calculated probability distribution functions of the active layer thickness are in good agreement with the observations at several sites in different physiographic zones in the Russian North. The method is used to predict changes in the active layer thickness under the climatic condition forecast for the mid-21st century.

Modeling, active layer, variability, ensemble approach, stochastic prediction

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование является мощным инструментом для пространственного обобщения данных редкой сети наблюдений за вечной мерзлотой и для прогноза ее состояния в условиях будущего климата. Модели вечной мерзлоты различной степени сложности хорошо известны и описаны в научной литературе [Демченко и др., 2002; Анисимов, Белолуцкая, 2003; Goodrich, 1982; Nelson, Outcalt, 1987; Waelbroeck, 1993; Sten-del, Christensen, 2002; Sazonova, Romanovsky, 2003]. С их помощью были получены оценки площади распространения, глубины сезонного оттаивания и температуры многолетнемерзлых пород для современных условий и нескольких прогнозов изменения климата в XXI в. для территории России [Гречищев, 1997; Павлов, 1997; Малевский-Малевич и др., 1999, 2000, 2007; Геокриологические..., 2000;

Малевский-Малевич, Надежина, 2002], отдельных ее регионов [Sazonova et al., 2004] и всего Северного полушария [Анисимов и др., 1999; Аржанов и др., 2007; Павлова и др., 2007; Anisimov, Nelson, 1997; Anisimov et al., 1997; Lawrence, Slater, 2005].

Все разработанные до настоящего времени модели вечной мерзлоты относятся к детерминистическому типу. Первоначально они разрабатывались для расчетов в отдельных точках, при этом предполагалось, что все необходимые входные данные могут быть определены с высокой точностью. С развитием геоинформационных технологий модели стали применяться и для расчетов по большим территориям с пространственно распределенными влияющими параметрами. Такие расчеты обычно проводятся с использованием регулярной сетки, в узлах задаются характерные зна-

чения параметров климата, растительности и почвы, принимаемые за средние по соответствующей пространственной ячейке. Наилучшее разрешение, которого удалось достичь, составляет $0,5^\circ$ по широте и долготе; более детальные расчеты лимитированы отсутствием входных данных высокого разрешения. Такой подход оправдан при использовании крупнорегионального и континентального масштабов и лишь при условии, что естественная изменчивость параметров вечной мерзлоты в пределах ячеек расчетной сетки незначительна для решаемой задачи, и можно ограничиться расчетом их средних значений. В общем же случае неизбежно возникает противоречие между детерминизмом моделей и стохастической природой процессов, формирующих термический режим многолетнемерзлых грунтов. Географическое распределение мощности сезонноталого слоя (СТС) подчиняется биоклиматической зональности, которая определяет ее характерные величины в зависимости от конкретных внешних условий. Эта детерминистическая составляющая достаточно хорошо описывается современными моделями. За рамками при этом остается стохастическая составляющая изменчивости. Между тем мощность СТС подвержена значительной изменчивости даже на относительно небольших расстояниях, и при моделировании ее целесообразно представлять в виде случайной величины, обладающей функцией распределения. Эту случайную составляющую невозможно учесть в рамках детерминистического метода. Далее будет дана оценка пространственной изменчивости мощности СТС по данным наблюдений, рассмотрена вероятностно-статистическая модель СТС,

основанная на ансамблевом подходе, приведена оценка точности модели на основе сравнения с наблюдениями по статистическим критериям, а также представлен вероятностный прогноз изменения глубины сезонного оттаивания многолетнемерзлых грунтов на территории России для середины XXI в.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ОТТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Показательны данные наблюдений за глубиной сезонного оттаивания многолетнемерзлых грунтов, полученные в рамках программы циркумполярного мониторинга, обозначаемой аббревиатурой ее английского названия CALM (<http://www.udel.edu/Geography/calm/>). Главным отличием CALM является то, что в ней оценивается пространственная изменчивость мощности СТС на площадках размером 1×1 км, измерения на которых проводятся через каждые 100 метров. Получаемая ежегодно на каждой площадке выборка содержит измерения в 121 точке, по которой можно построить функцию распределения. На рис. 1 приведены результаты измерений в Надыме и Марре-Сале, осредненные за период 1997–2007 гг. Видно, что большую роль играет локальная топография. Разброс значений мощности СТС в пределах одной площадки измеряется десятками сантиметров, причем если в Надыме большие значения обычно характерны для участков с депрессиями рельефа, то в Марре-Сале связь с топографией более сложная.

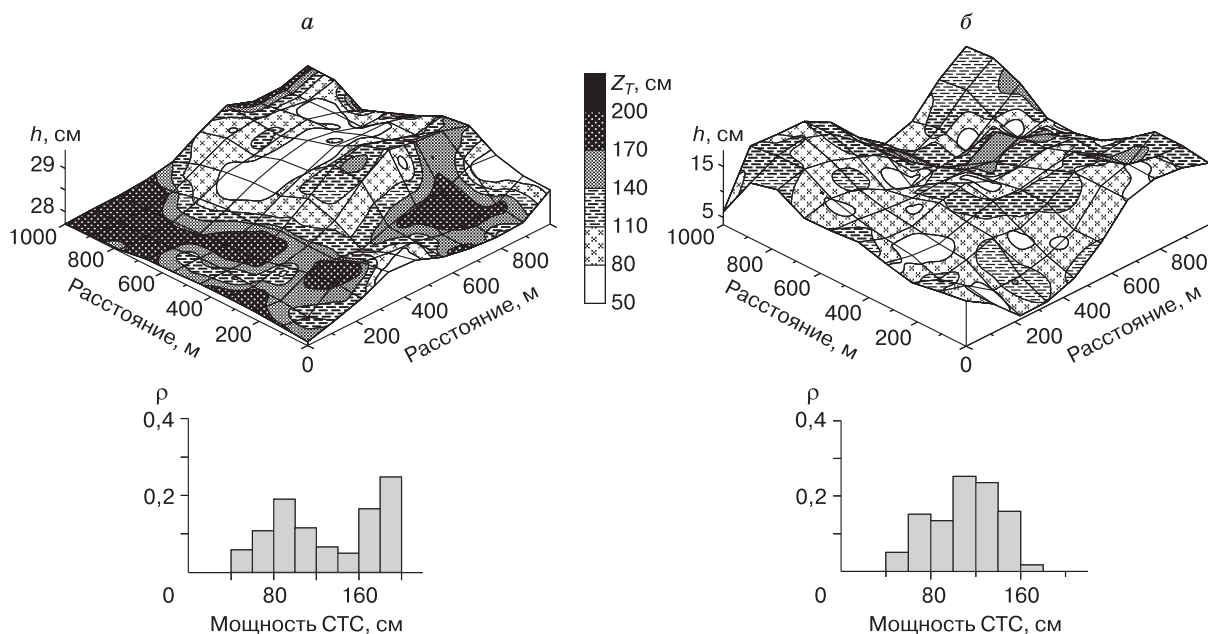


Рис. 1. Пространственные вариации мощности СТС (Z_T) и гистограммы плотности вероятности (ρ) мощности СТС на площадках CALM в Надыме (а) и Марре-Сале (б).

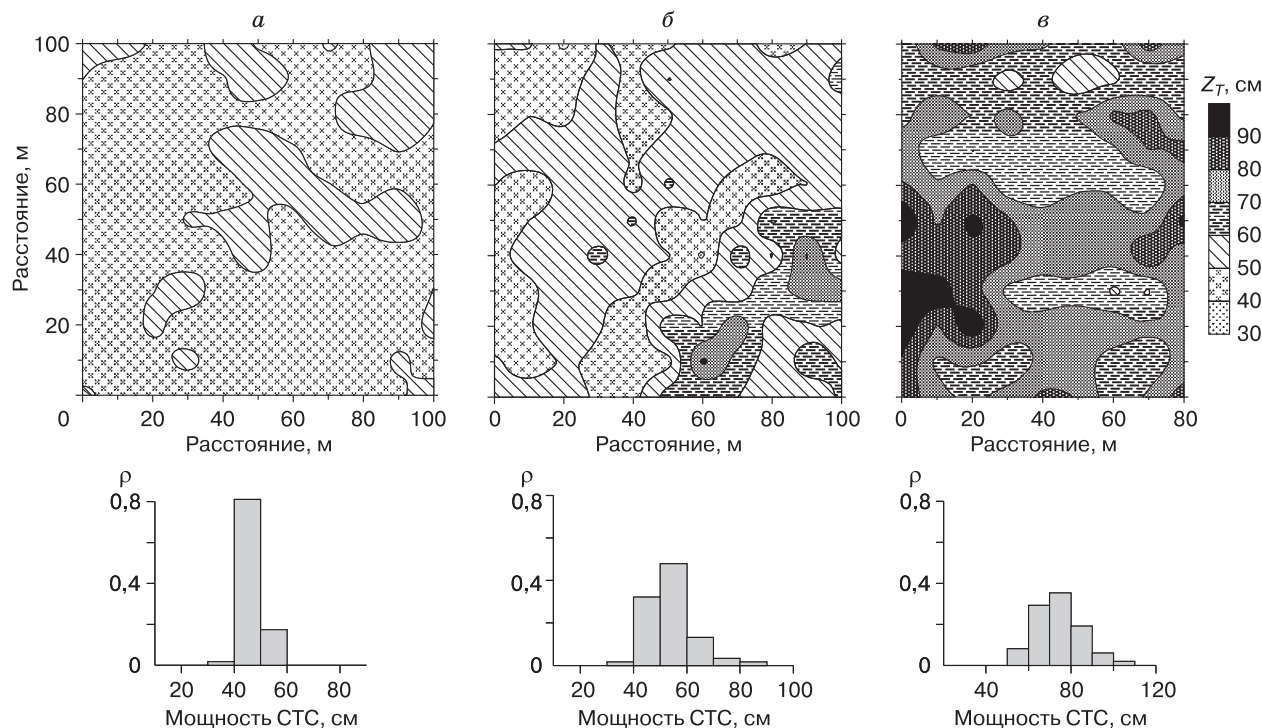


Рис. 2. Пространственные вариации мощности СТС (Z_T) на площадках размером 100×100 м и гистограммы плотности вероятности (ρ) мощности СТС в пределах площадок.

Дальний Восток: *a* – м. Рогожный, *b* – м. Дионисий; Европейский Север: *v* – Аяч-Яха.

Пространственная изменчивость мощности СТС проявляется и на меньших масштабах, при этом значительные вариации не всегда связаны с топографией. Так, на рис. 2 представлены результаты, полученные на площадках размером 100×100 м, где измерения проводились через каждые 10 метров. Результаты измерений усреднены за период 1997–2007 гг. На двух Дальневосточных площадках CALM мощность СТС ведет себя по-разному. На м. Рогожный (см. рис. 2, *a*) она достаточно однородна в пространстве, в то время как на м. Дионисий (см. рис. 2, *b*) на расстояниях менее 100 м она может различаться вдвое. Особенно ярко выражена изменчивость на площадке Аяч-Яха вблизи Воркуты на Европейском Севере (см. рис. 2, *v*), где вариации достигают десятков сантиметров.

Даже крупные вариации мощности СТС остаются за рамками детерминистического метода, поскольку причиной их возникновения являются не учитываемые в моделях случайные флуктуации параметров окружающей среды. Как следует из рис. 1, локальная топография не всегда является главным фактором изменчивости. Важную роль играет распределение снежного покрова, вариации влажности/льдистости грунта, высоты и состава растительности и особенно толщины органичес-

кого слоя. В результате возникает закономерный вопрос: можно ли в принципе дать правильную интерпретацию и считать соответствующими действительности детерминистические расчеты, представленные в виде единственного числа, характеризующего среднюю для заданных условий мощность СТС, и с чем сравнивать такие расчеты? Средняя величина может оказаться лишь математической абстракцией, которая на данной площадке не встречается ни в одной точке. Это обстоятельство ставит под сомнение целесообразность использования детерминистического метода моделирования, особенно если речь идет о решении инженерных задач, где важны не столько средние значения величин, сколько вероятности превышения ими заданных пределов.

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Альтернативным детерминистическому является вероятностно-статистический подход, в рамках которого макромасштабные изменения в пространстве и во времени влияющих параметров задаются явно, а их случайные флуктуации, которые приводят к ансамблю различных состояний многолетнемерзлого грунта, описываются статисти-

чески. Это позволяет учесть изменчивость свойств почвы, растительности, снежного покрова и топографии, которые порождают случайные вариации температуры и глубины сезонного оттаивания многолетнемерзлых грунтов в небольших пространственных масштабах. Получаемые характеристики ансамбля позволяют оценить как средние значения мощности СТС, так и ее изменчивость в пределах небольших территорий, которые в рамках детерминистического метода считаются однородными. Немаловажно и то, что имеется возможность прямого сравнения результатов расчетов по вероятностно-статистической модели, представленных в виде ансамбля, с выборками, получаемыми в процессе измерений, путем оценки точности модели по ее способности воспроизводить статистику выборки для рассчитываемой величины.

Теоретические основы вероятностно-статистического моделирования мощности СТС и пример построения простейшей модели для долины р. Купарук на Аляске были изложены в работе [Anisimov et al., 2002]. Отметим, что этот подход во многом аналогичен ансамблевому методу прогнозирования климата с использованием результатов различных гидродинамических моделей или же одной модели с различными начальными условиями. В климатологии преимущества ансамблевого метода оказались столь велики и неоспоримы, что отдельно взятые модели сейчас крайне редко используются для построения прогнозов, а в случае, если это все же происходит, такие прогнозы считаются малодостоверными. По нашему мнению, в недалеком будущем аналогичная ситуация может сложиться и в прогностической геофизиологии.

Алгоритмически метод ансамблевого осреднения состоит в том, что в каждой ячейке пространственной сетки проводится несколько расчетов с различными комбинациями варьируемых вокруг средних значений параметров, описывающих свойства снежного покрова, растительности и почвы. В случае, если известна погрешность климатических характеристик в данной точке, их также можно включить в число варьируемых параметров. В результате получают выборки значений исследуемых величин (например, температуры или максимальной глубины сезонного оттаивания многолетнемерзлых грунтов), по которым можно оценить их функции распределения. Собственно модель при этом является детерминистической, стохастичность же методу придает описанный выше алгоритм формирования статистического ансамбля (выборки) решений. При выборе конкретной модели для использования в ансамблевых расчетах необходимо принимать во внимание следующее.

Математический формализм всех моделей оттаивания и промерзания грунтов основан на реше-

нии задачи Стефана. Особенностью задачи является наличие подвижных границ раздела мерзлого и талого грунта, на которых происходят фазовые переходы влаги. Наиболее совершенные динамические модели позволяют рассчитывать последовательные изменения во времени положения этих границ, а также многие параметры термического режима протаивающих и промерзающих грунтов. Однако для больших территорий достоинства этих моделей невозможно реализовать на практике из-за отсутствия всех необходимых для расчета данных. Целесообразным представляется "точечное" применение таких моделей для проведения инженерных расчетов на ограниченных площадках, где есть возможность измерить все требуемые параметры.

С учетом качества и пространственного разрешения имеющихся данных о климате, растительности, снежном покрове и почве наиболее оптимальными продолжают оставаться стационарные модели, основанные на алгоритме, впервые предложенном В.А. Кудрявцевым [Кудрявцев и др., 1974]. В каноническом варианте модели расчет температуры почвы осуществляется в несколько этапов, при этом последовательно учитывается влияние снежного покрова, растительности и температурной сдвижки, обусловленной различием коэффициентов теплопроводности талого и мерзлого грунта. Влияние растительного покрова на годовую амплитуду температуры почвы и ее среднее значение учитывается посредством введения аддитивных поправок, рассчитываемых по заданной эффективной температуропроводности и высоте растительности.

Для повышения точности нами разработан модифицированный алгоритм, в котором явно задается толщина органического слоя. В канонической модели почва рассматривается как однородный слой, его теплофизические характеристики рассчитываются как средневзвешенные для верхней органической части и нижней минеральной, причем в качестве весовых коэффициентов используются относительные доли этих двух слоев в верхнем метровом слое почвы. Как и в канонической модели, в модифицированном варианте рассматриваются последовательные изменения амплитуды (A) и среднегодовой величины температуры по мере прохождения растительного и снежного покрова. Далее рассматривается двуслойная почвенная среда, в которой задан органический слой толщиной $h_{орг}$. Теплофизические характеристики органического слоя и нижележащего грунта для талого и мерзлого состояний задаются параметризациями через влажность и различаются в зависимости от гранулометрического состава. На рис. 3 представлена схема модифицированной

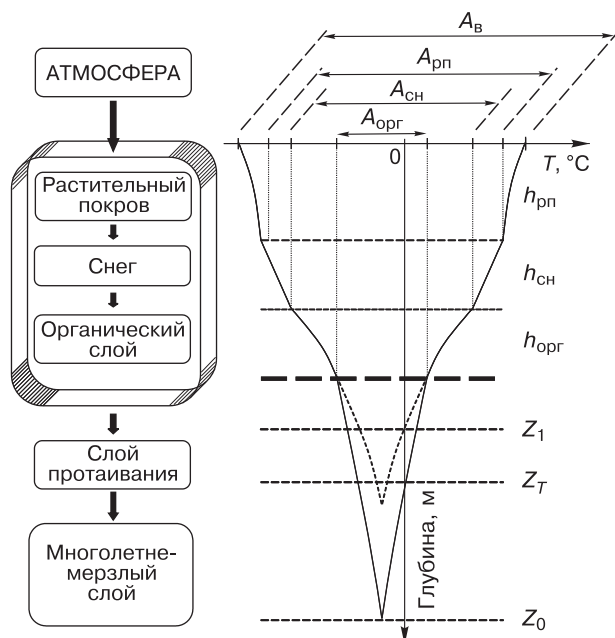


Рис. 3. Схема модифицированной стационарной модели вечной мерзлоты.

модели, показана огибающая годовых температурных колебаний, амплитуда которых затухает по мере погружения в грунт и становится пренебрежимо малой на глубине Z_0 . Глубина сезонного оттаивания грунта (Z_T) геометрически располагается на пересечении огибающей и вертикальной линии, проходящей через $0\text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 3 использованы следующие обозначения: $A_в, A_{рп}, A_{сн}, A_{орг}$ – амплитуда годовых колебаний температуры на различных уровнях в воздухе, под растительным покровом, под слоем снега и на нижней границе органического слоя соответственно; $h_{рп}$ – высота растительного покрова; $h_{сн}$ – высота снега; $h_{орг}$ – толщина органического слоя почвы; Z_1 – расчетная глубина сезонного оттаивания органической почвы; Z_T – расчетная глубина сезонного оттаивания многолетнемерзлого грунта с учетом органического слоя; Z_0 – глубина проникновения годовых колебаний температуры.

Алгоритм расчета состоит из двух последовательных прогонов. На первом прогоне рассчитывается глубина сезонного оттаивания грунта (Z_1) в предположении, что вся его толща состоит из органической почвы. На рис. 3 огибающая годовых температурных колебаний ниже органического слоя для этого случая показана пунктирной кривой. По результатам первого прогона с учетом экспоненциального закона затухания определяется амплитуда годовых колебаний температуры ($A_{орг}$) на границе раздела органического слоя и минерального грунта (жирная штриховая линия на рис. 3).

На втором прогоне проводится расчет глубины сезонного оттаивания Z_2 (на рисунке не показана) в предположении, что органический слой отсутствует, при этом необходимые для расчета по формуле Кудрявцева значения температуры на верхней границе (среднее и амплитуда) берутся из результатов первого прогона. Для определения суммарной глубины сезонного оттаивания двухслойной среды (Z_T) величину, полученную во втором прогоне, нужно увеличить на толщину органического слоя. В случае, если на первом прогоне глубина оттаивания грунта меньше толщины органического слоя, второй прогон делать не нужно.

Можно упростить этот алгоритм и явно не определять $A_{орг}$ используя во втором, как и в первом прогоне, значения всех параметров на уровне подстилающей поверхности ($T_в, A_в$). Используя представления о сезонных теплооборотах, можно показать, что в этом случае суммарная глубина сезонного оттаивания грунта с учетом органического слоя мощностью $h_{орг}$ определяется уравнением $Z_T = Z_2 + h_{орг}(1 - Z_2/Z_1)$.

Мы также воспользовались усовершенствованным методом описания теплооборотов в снежном покрове, предложенным в работе [Sazonova, Romanovsky, 2003]. В остальном модель не отличалась от описанной ранее в [Анисимов, Белолуцкая, 2003], по этой причине ее математический формализм в полном объеме здесь не приводится.

Для формирования статистического ансамбля в каждой точке проводилось 36 расчетов. Варьировалась высота снежного покрова (ей придавались три значения, равные расчетной норме, половине и удвоенной норме, что позволяло имитировать неоднородность снега за счет ветрового переноса и рельефа), варьировались высота слоя приземной мохово-лишайниковой растительности (два значения – 5 и 10 см), толщина верхнего органического горизонта почвы (три значения – 5, 10 и 20 см), а влажность почвы принимала два фиксированных значения, неизменных в течение года (200 и 350 мм/м).

На рис. 4 проводится сравнение результатов модельных расчетов мощности СТС в период 1994–2006 гг. с наблюдениями на шести площадках, расположенных в Западной Сибири, Якутии и на Дальнем Востоке: Надым (R1), Аяч-Яха (R2), Марре-Сале (R3), Васькины Дачи (R5), м. Рогожный (R9), м. Дионисий (R11). Пространственная изменчивость мощности СТС на некоторых из них показана на рис. 1, 2. Описание площадок и их местоположение даны на веб-странице проекта CALM (<http://www.udel.edu/Geography/calm/>). На рис. 4 сохранены исходные буквенные обозначения площадок. Расчетная статистика сравнивалась с данными измерений, при этом свидетельством высокой точности модели было то, что на выходе

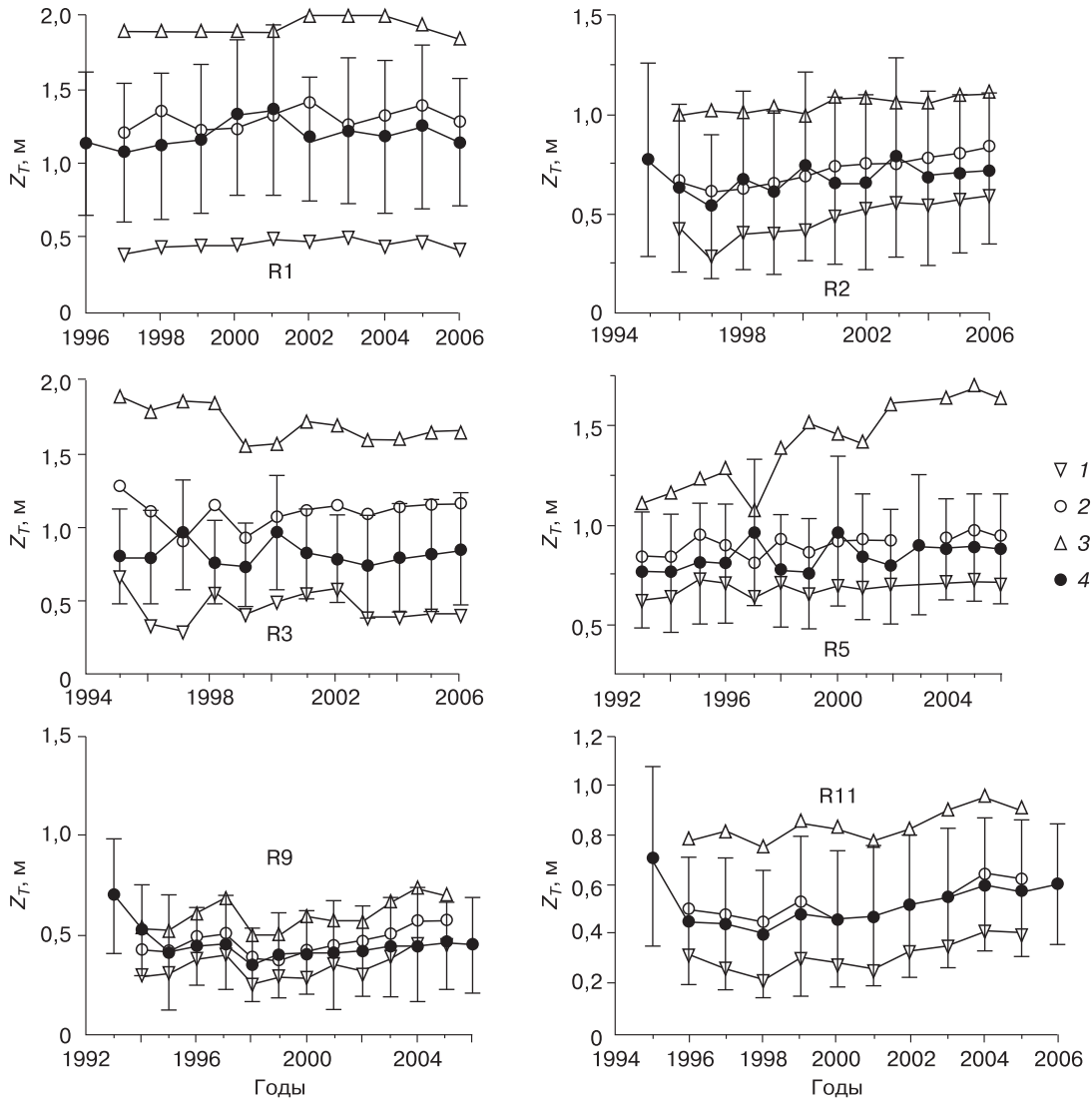


Рис. 4. Сравнение измеренной и расчетной мощности СТС (Z_T) по шести площадкам CALM:

R1 – Надым, R2 – Аяч-Яха, R3 – Марре-Сале, R5 – Васькины Дачи, R9 – м. Рогожный, R11 – м. Дионисий;
 1–3 – минимальное, среднее и максимальное значения мощности СТС по данным измерений; 4 – среднее значение мощности СТС по результатам модельных расчетов; вертикальные отрезки – 95%-й доверительный интервал по модельным расчетам.

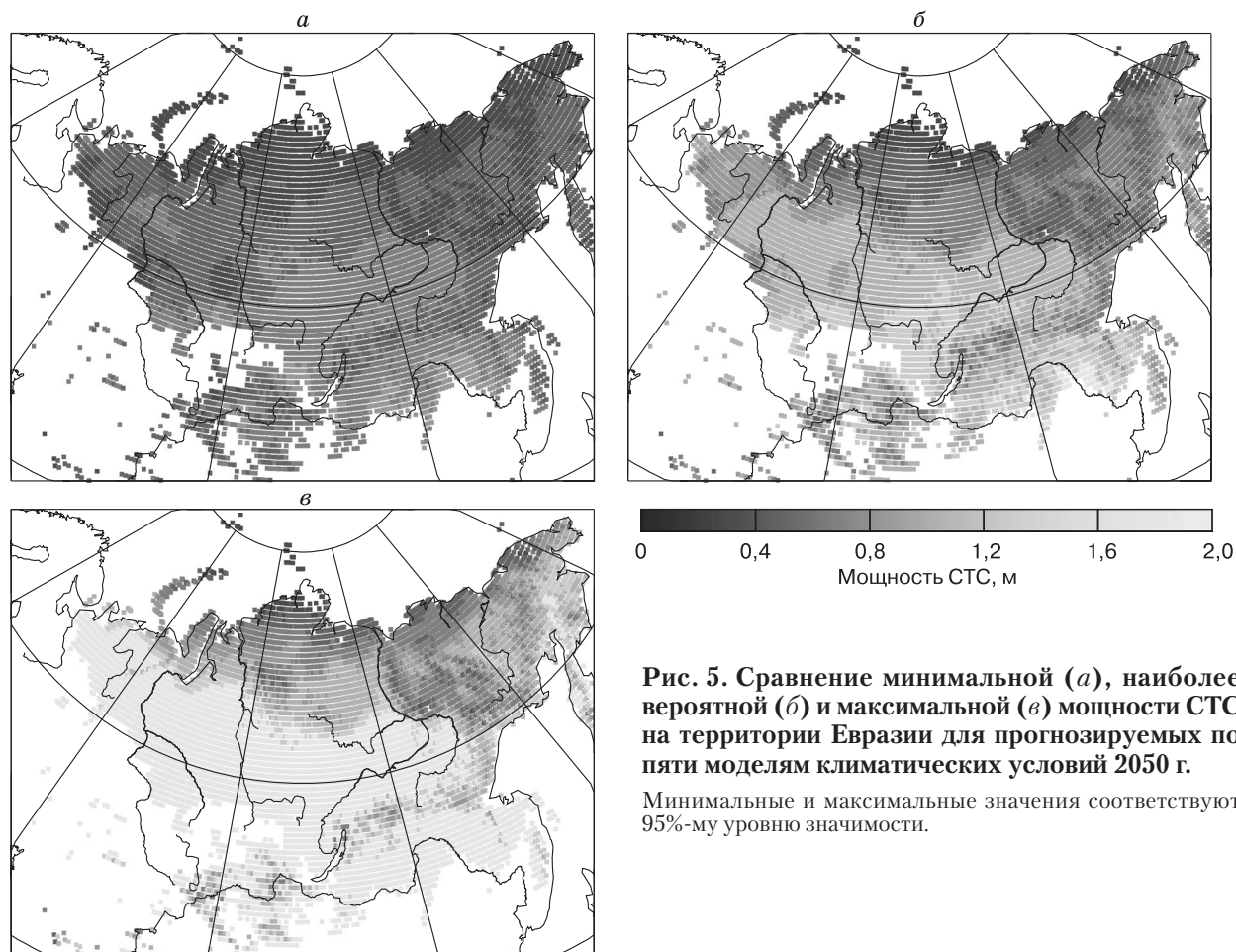


Рис. 5. Сравнение минимальной (а), наиболее вероятной (б) и максимальной (в) мощности СТС на территории Евразии для прогнозируемых по пяти моделям климатических условий 2050 г.

Минимальные и максимальные значения соответствуют 95%-му уровню значимости.

расчета получают значения мощности СТС, укладываемые в полученный по 121 измерению диапазон ее изменений на площадке. На рис. 4 сравниваются три параметра: средняя, минимальная и максимальная величины мощности СТС. Видно, что расчеты хорошо согласуются с измерениями.

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ МОЩНОСТИ СТС

Методика моделирования на основе ансамблевого осреднения дает возможность на качественно ином уровне формулировать задачу прогноза состояния многолетнемерзлых грунтов, максимально приблизив ее к требованиям практики. Так, помимо средних характерных для заданных внешних условий значений параметров можно, рассчитав их ансамблевые дисперсии, представить наибольшие и наименьшие значения, попадающие в 95%-й доверительный интервал. Пример такого расчета мощности СТС для территории России с использованием одного из возможных сценариев изменения климата для середины XXI в. приведен

на рис. 5. Расчеты были проведены для пяти различных климатических сценариев (CGCM2, CSM-1.4, ECHAM4/OPYC3, GFDL-R30c, HadCM3), которые использовали сценарий эмиссии парниковых газов В2. Описание этих сценариев можно найти на веб-страницах Международной группы экспертов по изменению климата (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/> и <http://igloo.atmos.uiuc.edu/IPCC/>). На рис. 5 представлен результат для сценария GFDL, который является “средним” из всех полученных. Сценарии ECHAM4/OPYC3 и CSM-1.4 предсказывают в среднем по России большее увеличение мощности СТС, а сценарии CGCM2 и HadCM3 – несколько меньшее, чем сценарий GFDL, при этом имеются заметные региональные различия.

Несомненным преимуществом метода ансамблевого моделирования является то, что с его помощью можно получать оценки вероятности превышения параметрами многолетнемерзлых грунтов заданных значений. Для этого необходимо знать плотность вероятности рассматриваемой величины, а ее можно построить по рассчитанному ансамблю.

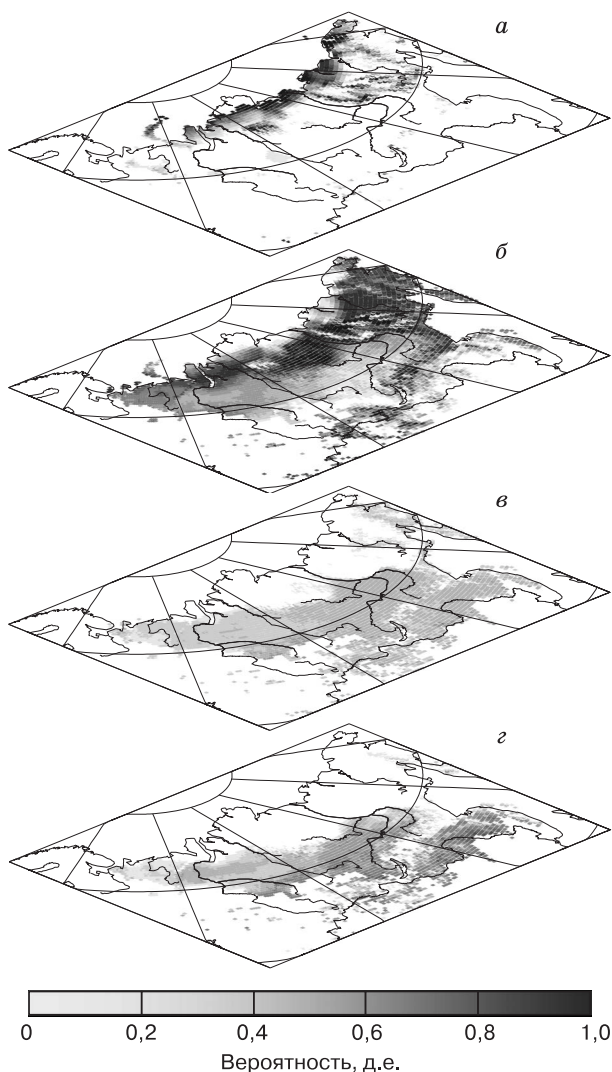


Рис. 6. Вероятность нахождения мощности СТС в заданном интервале значений:

а – $Z_T < 0,8$ м; *б* – $0,8 \text{ м} < Z_T < 1,5$ м; *в* – $1,5 \text{ м} < Z_T < 1,8$ м; *г* – $Z_T > 1,8$ м. Расчет по климатическому сценарию GFDL для 2050 г.

Такую возможность на примере мощности СТС иллюстрирует рис. 6. Представленные на нем карты принципиально отличаются от традиционных тем, что вместо глубины сезонного оттаивания грунтов, характеризуемой “средним” для данной точки значением, на них показана вероятность того, что она находится в заданном интервале глубин. Эта вероятность рассчитывается на основе частотного анализа выборки, полученной при помощи ансамблевого моделирования, при этом границы и число классов можно устанавливать произвольно. Например, на рис. 6 выделены четыре класса с неравномерным разбиением по мощности СТС для того, чтобы обеспечить достаточное за-

полнение каждого из них. Следует отметить, что при построении карт на рис. 5 и 6 использовались одни и те же данные ансамблевого расчета, однако не вызывает сомнений, что последний рисунок гораздо более информативен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод ансамблевого моделирования выигрывает в сравнении с детерминистическими моделями и более полно отвечает требованиям, предъявляемым современной инженерной геокриологией. Идеология инженерных расчетов в условиях меняющегося климата и флуктуирующих свойств окружающей среды основана на вероятностных оценках заданной обеспеченности. Например, важно знать, какова вероятность того, что температура многолетнемерзлых пород под фундаментом сооружения поднимется выше критической отметки, за которой он утратит устойчивость. Информацию об этом можно получить только при помощи ансамблевого моделирования.

Вопрос о влиянии неопределенности исходных климатических данных и прогнозов на точность оценок состояния вечной мерзлоты остался за рамками данной статьи. Разработанный метод вероятностно-статистического моделирования позволяет учесть также и этот фактор, поскольку несущественно, являются ли причиной возникновения погрешности расчета вариации параметров почвы, снега и растительности или же неопределенность климатических данных. Анализ неопределенности, вносимой климатическими данными, и сравнению результатов, полученных с использованием различных архивов, будет посвящена следующая статья.

Автор выражает благодарность А.А. Ершовой и Ю.Г. Стрельченко за помощь в подготовке рисунков, а также Н.И. Шикломанову за предоставление полного объема данных измерений по программе CALM и ценные замечания при обсуждении публикации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 07-05-00209, 07-05-13527), лаборатории им. Отто Шмидта (проект OSL-09-04) и Национального агентства США по изучению космического пространства (проект NASA NNX-08AP30G).

Литература

- Анисимов О.А., Белолуцкая М.А.** Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогноз и оценка неопределенности // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб., Гидрометеоздат, 2003, с. 21–38.
- Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э., Павлов А.В.** Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 4, с. 15–25.

Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 65–69.

Геокриологические опасности. 1. Природные опасности России / Ред. Л.С. Гарагуля, Э.Д. Ершов. М., Изд. фирма "Крук", 2000, 315 с.

Гречищев С.Е. Прогноз оттаивания и распределения вечной мерзлоты и изменения криогенного растрескивания грунтов на территории России при потеплении климата // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 1, с. 59–65.

Демченко П.Ф., Величко А.А., Елисеев А.В. и др. Зависимость условия распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеорекоkonструкций // Физика атмосферы и океана, 2002, т. 38, № 2, с. 165–174.

Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М., Наука, 1974, 431 с.

Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д. и др. Модельные расчеты мощности 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. и др. Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 1, с. 29–36.

Малевский-Малевиц С.П., Надежина Е.Д. Оценки влияния изменений климата на вечную мерзлоту в России, основанные на модельных сценариях изменений климата // Изменения климата и их последствия. СПб., Наука, 2002, с. 231–239.

Малевский-Малевиц С.П., Надежина Е.Д., Симонов В.В. и др. Оценки воздействий изменений климата на режим оттаивания многолетнемерзлых грунтов // Современные исследования главной геофизической обсерватории. СПб., Гидрометеоздат, 1999, с. 33–51.

Павлов А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 1, с. 47–58.

Павлова Т.П., Катцов В.М., Надежина Е.Д. и др. Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 2, с. 3–13.

Anisimov O.A., Nelson F.E. Permafrost zonation and climate change in the northern hemisphere: results from transient general circulation models // Climatic Change, 1997, vol. 35, No. 2, p. 241–258.

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, No. 3–4, p. 61–77.

Anisimov O.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Variability of seasonal thaw depth in permafrost regions: a stochastic modeling approach // Ecol. Modelling, 2002, vol. 153, No. 3, p. 217–227.

Goodrich L.E. The influence of snow cover on the ground thermal regime // Can. Geotechn. J., 1982, vol. 19, p. 421–432.

Lawrence D.M., Slater A.G. A projection of severe nearsurface permafrost degradation during the 21st century // Geophys. Res. Lett., 2005, vol. 32, No. L24401, doi: 10.1029/2005GL025080.

Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost // Arctic and Alpine Res., 1987, vol. 19, No. 3, p. 279–288.

Sazonova T.S., Romanovsky V.E. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures // Permafrost and Periglacial Processes, 2003, vol. 14, No. 2, p. 125–140.

Sazonova T.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Sergueev D.O. Permafrost dynamics in the 20th and 21st centuries along the East Siberian transect // J. Geophys. Res.: D, 2004, vol. 109, No. D1.

Stendel M., Christensen J.H. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM // Geophys. Res. Lett., 2002, vol. 29, No. 13, doi: 10.1029/2001GL014345.

Waelbroeck C. Climate-soil processes in the presence of permafrost: a system modelling approach // Ecol. Modelling, 1993, vol. 6, No. 3–4, p. 185–225.

*Поступила в редакцию
30 октября 2008 г.*