

ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО И БУДУЩЕГО КЛИМАТА: РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.А. Анисимов

*Государственный гидрологический институт, 199053, С.Петербург, 2-ая Линия В.О., 23,
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 плотности вероятности глубины сезонного таяния хорошо согласуются с данными наблюдений на ряде площадок в различных регионах Севера России. Метод применяется для вероятностно-статистического прогноза изменения глубины сезонного протаивания криолитозоны России в условиях прогнозируемого на середину 21 века климата.

Вечная мерзлота, моделирование, изменчивость, ансамблевое осреднение, вероятностно-статистический прогноз.

PERMAFROST UNDER THE CONDITIONS OF THE CURRENT AND FUTURE CLIMATE: RESULTS OF STOCHASTIC MODELLING

O.A. Anisimov

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

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 [Анисимов, Белолуцкая, 2003; Демченко *et al.*, 2002; Малевский-Малевич *et al.*, 2000; Малевский-Малевич *et al.*, 2005; Goodrich, 1982; Nelson, Outcalt, 1987; Sazonova, Romanovsky, 2003; Stendel, Christensen, 2002; Waelbroeck, 1993]. С их помощью были получены оценки площади распространения, глубины сезонного протаивания и температуры многолетнемерзлых пород

для современных условий и для нескольких прогнозов изменения климата в 21 веке для территории России [Гарагуля, Ершов, 2000; Гречищев, 1997; Малевский-Малевич *et al.*, 2000; Малевский-Малевич *et al.*, 2007; Малевский-Малевич, Надежина, 2002; Малевский-Малевич *et al.*, 1999; Павлов, 1997], отдельных ее регионов [Sazonova *et al.*, 2004] и всего северного полушария [Анисимов *et al.*, 1999; Аржанов *et al.*, 2007; Павлова *et al.*, 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 значения параметров климата, растительности и почвы, принимаемые за средние по соответствующей пространственной ячейке. Наилучшее разрешение, которое удалось достичь, составляет 0.5° по широте и долготе; более детальные расчеты лимитированы отсутствием входных данных высокого разрешения. Такой подход оправдан при использовании крупнорегионального и континентального масштаба 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 и сезонное протаивание многолетнемерзлых грунтов. Так, в пределах любой ячейки глубина сезонного таяния является случайной величиной, обладающей функцией распределения, что принципиально невозможно учесть в рамках детерминистического метода.

Показательны в этом отношении данные наблюдений за вечной мерзлотой, полученные в рамках программы циркумполярного мониторинга (далее в статье обозначаемая аббревиатурой ее английского названия CALM, см. <http://www.udel.edu/Geography/calm/>). Главным отличием CALM является то, что в ней оценивается пространственная изменчивость глубины сезонного таяния 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 глубины сезонного таяния. На рисунке 1 показаны результаты измерений в Надыме и Марре-Сале, осредненные за период 1997-2007 гг. Видно, что большую роль играет локальная топография. Разброс значений глубины таяния 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.

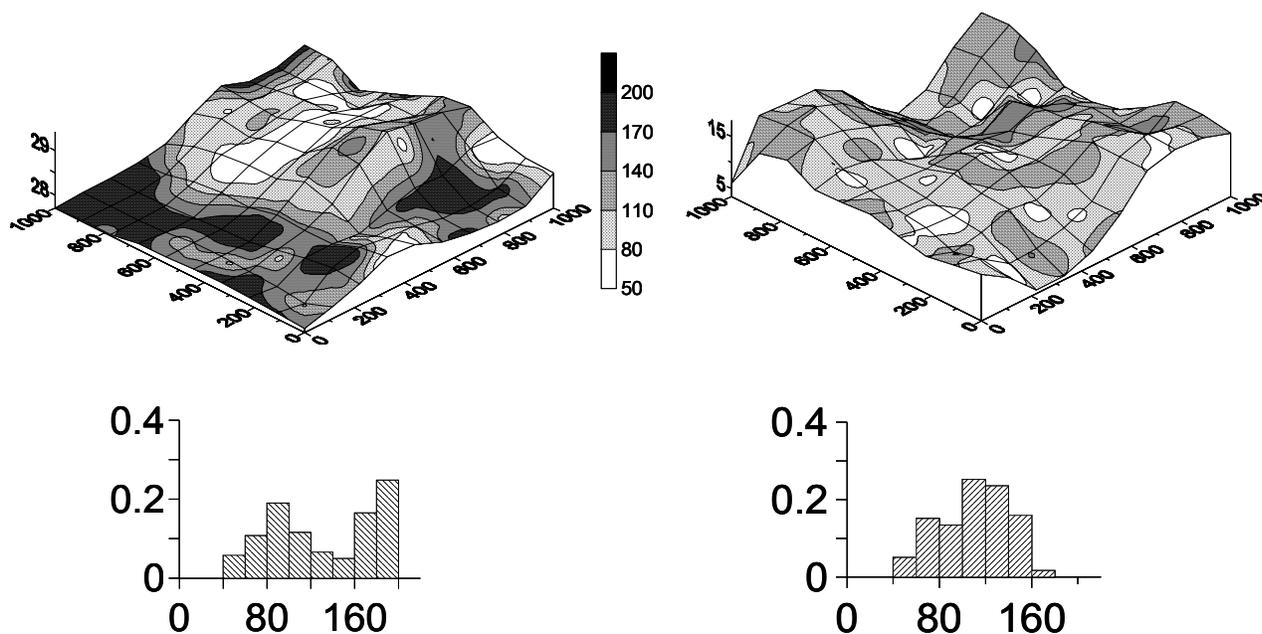


Рис. 1. Пространственные вариации глубины сезонного таяния на площадках CALM в Надыме (А) и в Марре-Сале (Б). Соответствующие частотные гистограммы приведены в нижнем ряду. При построении рисунков использованы данные измерений, представленные на сайте <http://www.udel.edu/Geography/calm/>, осредненные за период 1997-2007 гг.

Пространственная изменчивость глубины сезонного таяния проявляется и на меньших масштабах, причем значительные вариации не всегда связаны с топографией. Так, на рисунке 2 показаны результаты, полученные на меньших площадках размером 100×100 м, где измерения проводились через каждые 10 метров. На двух Дальневосточных площадках CALM глубина сезонного таяния ведет себя по-разному. На мысе Рогожный (рис. 2А) она достаточно однородна в пространстве, в то время как на мысе Дионисий (рис. 2Б) на расстояниях менее 100 метров она может различаться вдвое. В особенности ярко выражена изменчивость на площадке Аяч-Яха вблизи Воркуты на Европейском Севере (2В), где вариации достигают десятков сантиметров.

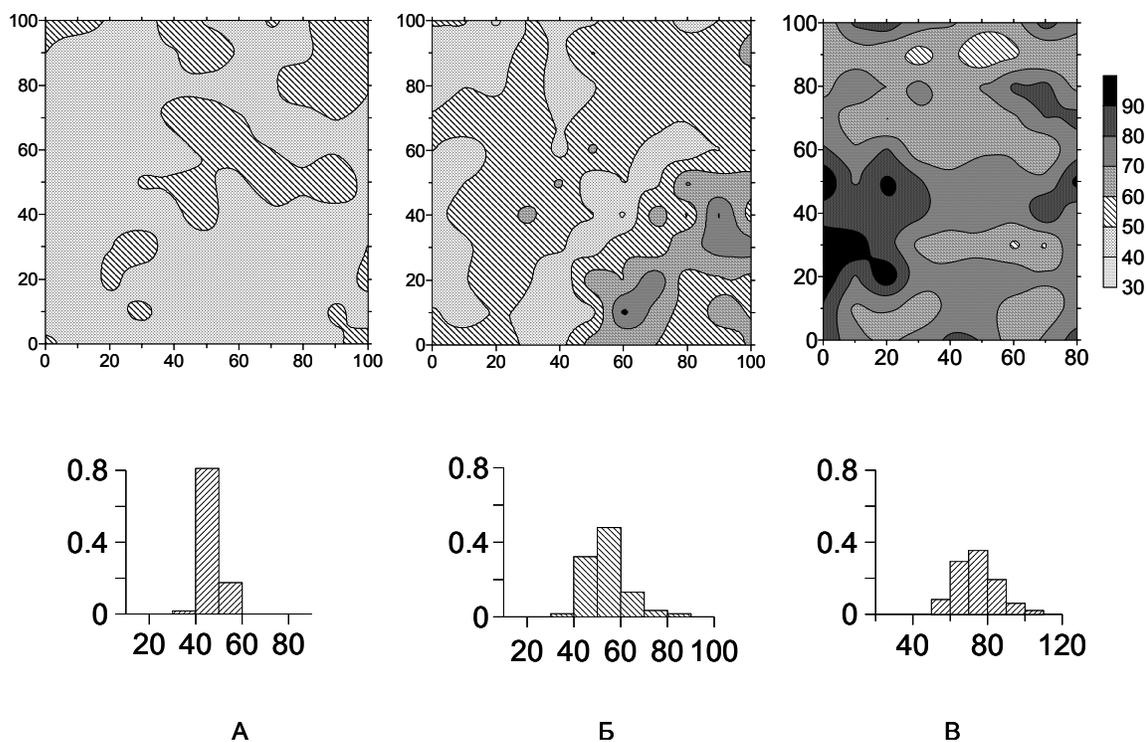


Рис. 2. Пространственные вариации глубины сезонного таяния на площадках размером 100×100 м. А, Б - мыс Рогожный и мыс Дионисий (Дальний Восток); В - Аяч-Яха (Европейский Север). В нижнем ряду - частотные гистограммы глубины таяния. Использованы данные измерений, представленные на сайте <http://www.udel.edu/Geography/calm/>, осредненные за период 1997-2007 гг.

Даже крупные вариации глубины сезонного таяния остаются за рамками детерминистического метода, поскольку причиной их возникновения являются не учитываемые в моделях случайные флуктуации параметров, влияющих на состояние вечной мерзлоты. Как следует из рисунка 1, локальная топография не всегда является главным фактором изменчивости. Важную роль играет распределение снежного покрова, вариации влажности/льдистости грунта, высоты и состава растительности и в особенности толщины органического 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 глубину сезонного таяния, и если да, то 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, в особенности если речь идет о решении инженерных задач, где важны не столько средние значения величин, сколько вероятности превышения ими заданных пределов.

Альтернативным детерминистическому является вероятностно-статистический подход, в рамках которого макромасштабные изменения в пространстве и времени влияющих на вечную мерзлоту параметров задаются явно, а их случайные флуктуации, которые приводят к ансамблю различных состояний многолетнемерзлого грунта, описываются статистически. Это позволяет учесть изменчивость свойств почвы, растительности, снежного покрова и топографии, которые порождают случайные вариации температуры и глубины сезонного таяния многолетнемерзлых грунтов на небольших пространственных масштабах. Получаемые характеристики ансамбля позволяют оценить как средние параметры вечной мерзлоты, так и их 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, оценивая точность модели по ее способности воспроизводить статистику выборки для рассчитываемой величины.

Теоретические основы вероятностно-статистического моделирования вечной мерзлоты и пример построения простейшей модели для долины реки Купарук на Аляске были изложены в нашей предшествующей 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 геокриологии.

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 грунта или же максимальной глубины сезонного таяния), по которым можно оценить их функции распределения. Собственно модель вечной мерзлоты 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 вечной мерзлоты основан на решении 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 вечной мерзлоты с учетом термической инерции. 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 имеется 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 *et al.*, 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 среднюю величину учитывается посредством введения аддитивных поправок, рассчитываемых по заданной эффективной теплопроводности и высоте растительности.

Для увеличения точности нами был 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 $h_{\text{орг}}$. Теплофизические характеристики органического слоя и нижележащего грунта для талого и мерзлого состояний задаются параметризациями через влажность и различаются в зависимости от гранулометрического состава. На рисунке 3 представлена схема модифицированной модели, показана огибающая годовых температурных колебаний, амплитуда которых затухает по мере погружения в грунт и становится пренебрежимо малой на глубине Z_0 . Глубина сезонного таяния Z_T геометрически располагается на пересечении огибающей и вертикальной линии, проходящей через $0\text{ }^\circ\text{C}$.

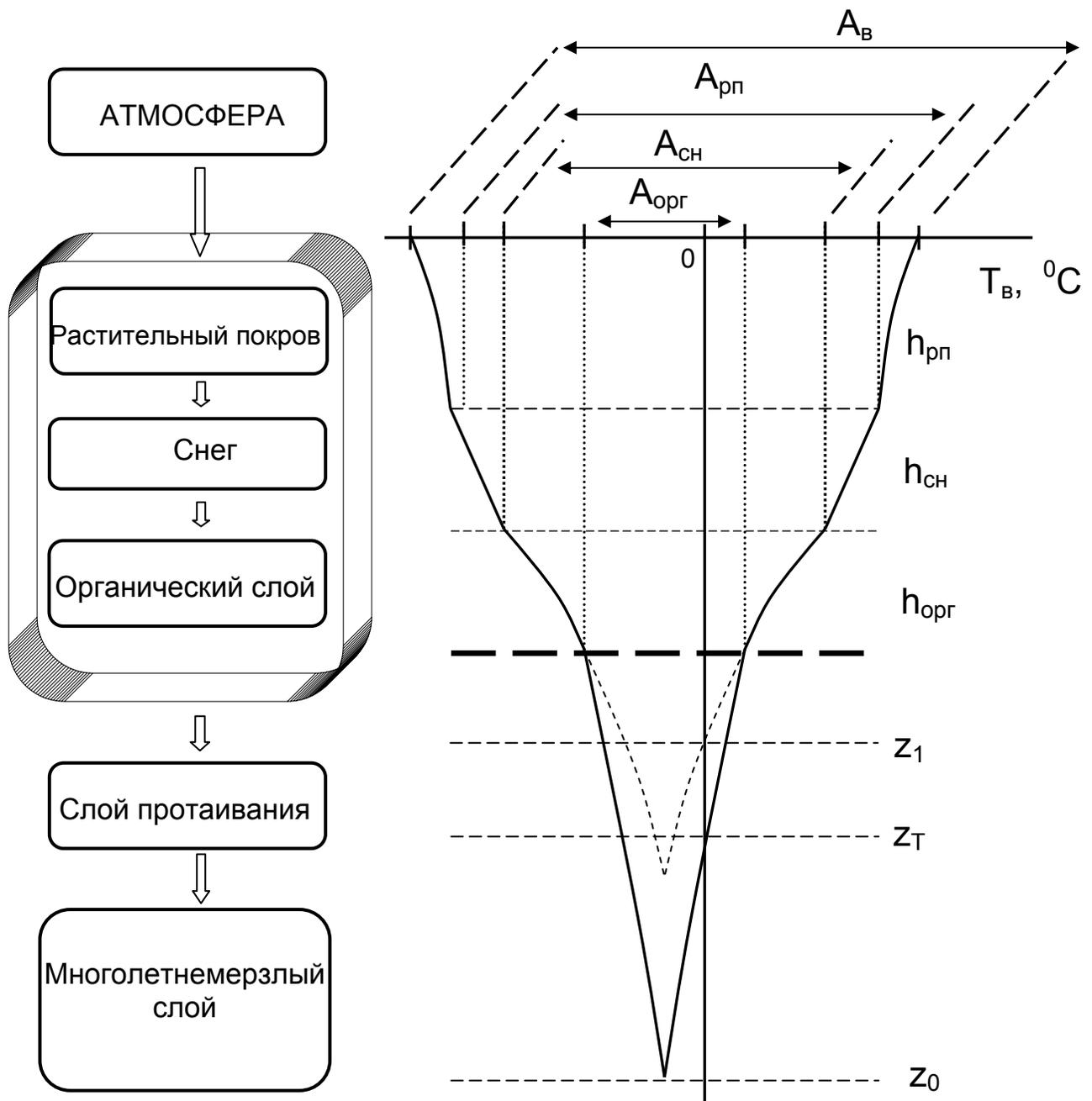


Рис. 3 – Схема расчета по модифицированной стационарной модели вечной мерзлоты.

Алгоритм расчета состоит из двух последовательных прогонов. На первом прогоне рассчитывается глубина сезонного протаивания Z_1 в предположении, что вся толща почвы органическая. На рисунке 3 огибающая годовых температурных колебаний ниже органического слоя для этого случая обозначена 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 (граница обозначена жирной пунктирной линией на рис. 3). На втором прогоне проводится расчет глубины сезонного протаивания Z_2 (на рисунке 3 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 протаивания двуслойной среды Z_T величину, полученную во втором прогоне, нужно увеличить на толщину органического слоя. В случае, если на первом прогоне глубина протаивания 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_B и A_B . Используя представления о сезонных теплооборотах, можно показать, что в этом случае суммарная глубина таяния с учетом органического слоя мощностью $h_{ОРГ}$ определяется уравнением:

$$Z_T = Z_2 + h_{ОРГ} (1 - Z_2 / Z_1) \quad (1)$$

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. Варьировались высота снежного покрова (ей придавались 3 значения, равные расчетной норме, половине нормы и удвоенной норме, что позволяло имитировать неоднородность снега за счет ветрового переноса и рельефа), высота слоя приземной мохово-лишайниковой растительности (2 значения, 5 и 10 см), толщина верхнего

органического горизонта почвы принимала 3 значения, 5 см, 10 см и 20 см, и влажность почвы принимала два фиксированных значения неизменных в течение года, 200 мм/м и 350 мм/м.

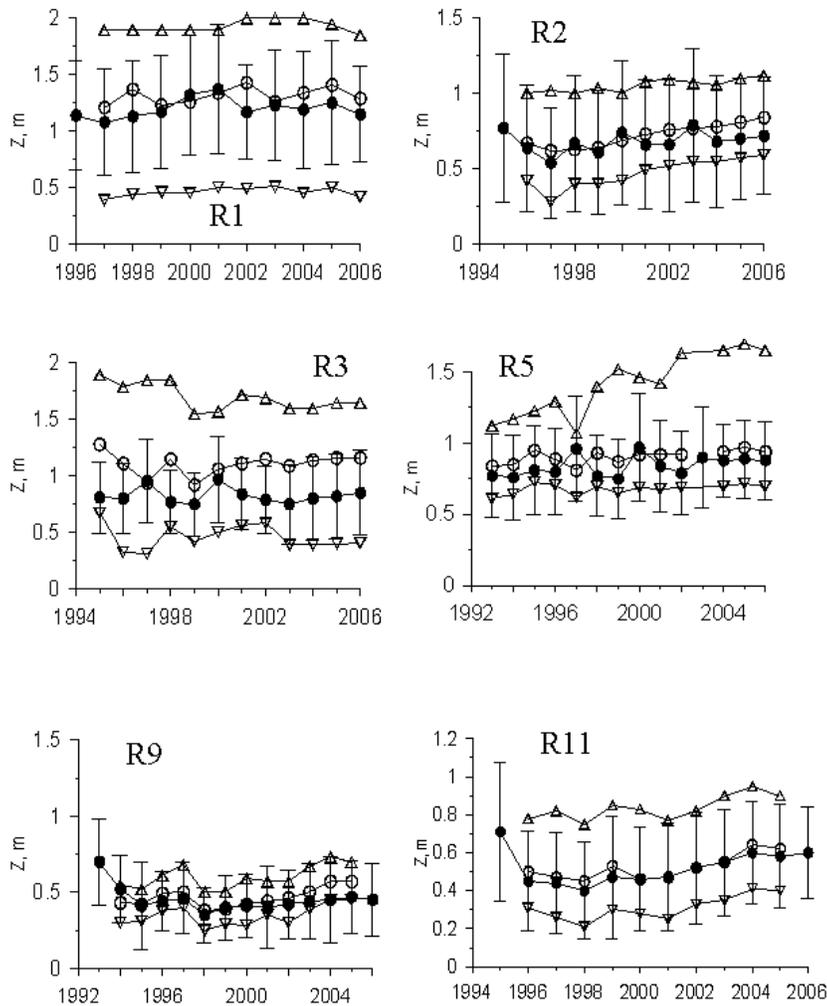


Рис. 4. Сравнение измеренных и расчетных глубин сезонного протаивания вечной мерзлоты по шести площадкам CALM. R1 – Надым, R2 – Аяч-Яха, R3 – Марре-Сале, R5 – Васькины дачи, R9 – м. Рогожный, R11 – м. Дионисий. Символы без заливки обозначают среднее, минимальное и максимальное значения по данным измерений, заполненные символы и вертикальные отрезки обозначают среднее и 95% доверительный интервал по модельным расчетам.

На рисунке 4 проводится сравнение результатов модельных расчетов глубины сезонного протаивания в период 1994-2006 г. с наблюдениями на 6 площадках, расположенных в Западной Сибири, Якутии и на Дальнем Востоке: Надым (R1), Аяч-Яха (R2), Маре-Сале (R3), Васькины дачи (R5), м. Рогожный (R9) и Дионисий (R11). Пространственная изменчивость глубины таяния на некоторых из них была показана на рисунках 1 и 2. Описание площадок и их местоположение даны на веб-странице проекта CALM, <http://www.udel.edu/Geography/calm/>. На рисунке сохранены исходные буквенные обозначения площадок. Расчетная статистика сравнивалась с результатами измерений, при этом свидетельством высокой точности модели было то, что на выходе расчета получаются значения глубины протаивания, укладывающиеся в полученный по 121 измерению диапазон ее изменений на площадке. На рисунке 4 сравниваются три параметра: средняя, минимальная и максимальная величина сезонного протаивания. Видно, что расчеты хорошо согласуются с измерениями.

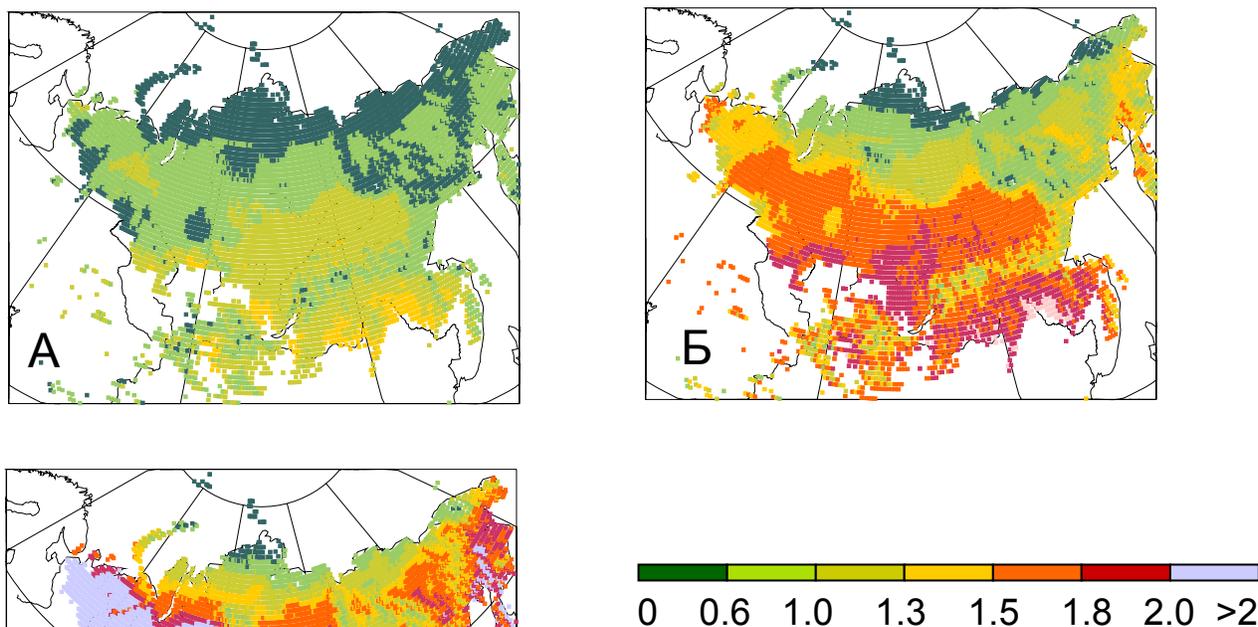


Рис. 5. Сравнение минимальной (А), наиболее вероятной (Б), и максимальной (В) глубины таяния вечной мерзлоты на территории Евразии для прогнозируемых по 5 моделям климатических условий 2050 г. Минимальные и максимальные значения соответствуют уровню 95%.

Методика моделирования вечной мерзлоты 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 также наибольшие и наименьшие значения, попадающие в 95% доверительный интервал. Пример такого расчета глубины сезонного таяния по криолитозоне России для прогнозируемого по сценарию GFDL на середину 21 века климата показан на рисунке 5. Расчеты были проведены для пяти различных климатических сценариев CGCM2, CSM-1.4, ECHAM4/OPYC3, GFDL-R30c и HadCM3, все они использовали сценарий эмиссии парниковых газов B2. 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/>. Отметим, что показанный результат для сценария GFDL является «средним» из всех полученных. Сценарии ECHAM4/OPYC3 и CSM-1.4 предсказывают в среднем по криолитозоне большее увеличение глубины сезонного таяния, 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.

Эту возможность на примере глубины сезонного таяния иллюстрирует рисунок 6. Представленные на нем карты принципиально отличаются от традиционных тем, что вместо глубины таяния, 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 рисунке 6 выделены 4 класса с неравномерным разбиением по глубине для того, чтобы обеспечить достаточное заполнение каждого из них. Надо отметить, что при построении карт на рисунках 5 и 6 использовались одни и те же данные

ансамблевого расчета, однако не вызывает сомнений, что последний рисунок гораздо более информативен.

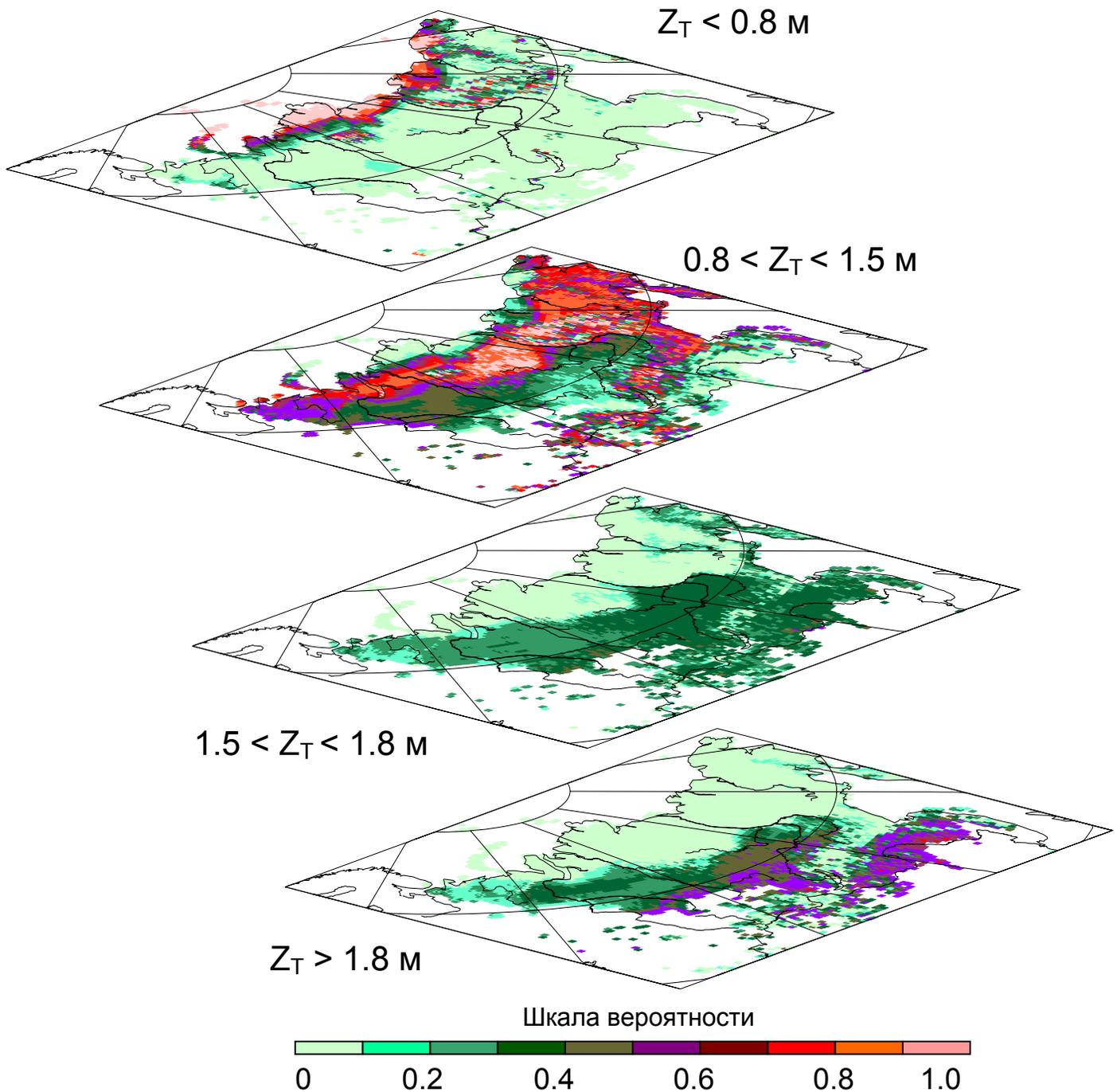


Рис. 6. Плотность вероятности попадания глубины сезонного таяния в заданные интервалы. Расчет по климатическому сценарию GFDL для 2050 г.

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.

В заключение отметим, что за рамками данной работы остался вопрос о влиянии неопределенности исходных климатических данных и прогнозов на точность оценок состояния вечной мерзлоты. Разработанный метод вероятностно-статистического моделирования позволяет учесть также и этот фактор, поскольку не существенно, 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 работа, которая находится в стадии завершения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 07-05-00209 и 07-05-13527. Автор выражает благодарность А. Ершовой и Ю. Стрельченко за помощь в подготовке рисунков, а также Н. Шикломанову за предоставление полного объема данных измерений по программе CALM.

Литература

Анисимов, О.А., Белолуцкая, М.А. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогноз и оценка неопределенности // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем / Ed / А. Израэль. С.Петербург, Гидрометеиздат, 2003, р. 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, vol. 3, No 4, р. 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, vol. XI, No 4, p. 65-69.

Гарагуля, Л.С., Ершов, Э.Д. (Editors). Геокриологические опасности. Природные опасности России, 1. Крук, М., 2000. 315 pp.

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

Демченко, П.Ф., Величко, А.А., Елисеев, А.В., Мохов, И.И., Нечаев, В.П. Зависимость условия распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеореконструкций // Физика атмосферы и океана, 2002, vol. 38, No 2, p. 165-174.

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

Малевский-Малевиц, С.П., Молькентин, Е.К., Надежина, Е.Д. Модельные оценки эволюции вечной мерзлоты и распределения слоя сезонного протаивания в зависимости от климатических условий в северных регионах Западной Сибири // Криосфера Земли, 2000, vol. 4, No 4, p. 49-57.

Малевский-Малевиц, С.П., Молькентин, Е.К., Надежина, Е.Д., Павлова, Т.П. Модельные оценки изменений температуры воздуха и эволюция теплового состояния многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли, 2005, vol. IX, No 3, p. 36-44.

Малевский-Малевиц, С.П., Молькентин, Е.К., Надежина, Е.Д., Павлова, Т.П., Семиошина, А.А. Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли, 2007, vol. XI, No 1, p. 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 / Ed / Г.В. Менжулин. С.Петербург, Наука, 2002, p. 231-239.

Малевский-Малевиц, С.П., Надежина, Е.Д., Симонов, В.В., Шкляревич, О.Б., Молькентин, К.К. Оценки воздействий изменений климата на режим протаивания многолетнемерзлых грунтов // Современные исследования главной геофизической обсерватории / Ed / М.Е. Берляндт and В.П. Мелешко. С.Петербург, Гидрометеоздат, 1999, p. 33-51.

Павлов, А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли, 1997, vol. 1, No 1, p. 47-58.

Павлова, Т.П., Катцов, В.М., Надежина, Е.Д., Спорышев, П.В., Говоркова, В.А. Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения // Криосфера Земли, 2007, vol. XI, No 2, p. 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 Planetary 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 // *Ecological Modelling*, 2002, vol. 153, No 3, p. 217-227.

Goodrich, L.E. The influence of snow cover on the ground thermal regime // *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, vol. 19, No p. 421-432.

Lawrence, D.M., Slater, A.G. A projection of severe nearsurface permafrost degradation during the 21st century // *Geophysical Research Letters*, 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 Research*, 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 // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2004, vol. 109, No D1, .

Stendel, M., Christensen, J.H. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM // *Geophysical Research Letters*, 2002, vol. 29, No 13, p. 10-1 - 10-4.

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