

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.581

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(3-10)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ СЕЗОННОТАЛОГО СЛОЯ
С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И РАСТИТЕЛЬНОСТИ:
ПРОГНОЗ НА СЕРЕДИНУ ХХІ ВЕКА И АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ**

О.А. Анисимов, В.А. Кокорев

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

Проведен анализ чувствительности модельных расчетов мощности сезонноталого слоя к вариациям главных влияющих на нее факторов: температуры воздуха, высоты снежного покрова и параметров растительности, в европейском и азиатском секторах криолитозоны России. Рассчитаны современные изменения среднееголетней мощности сезонноталого слоя между периодами 1961–1990 и 2004–2013 гг. Составлен согласованный сценарий изменения климата и растительности до середины ХХІ в., по которому проведены расчеты мощности сезонноталого слоя с учетом неопределенности влияющих на нее факторов. Показано, что к середине ХХІ в. наибольшего увеличения среднееголетней мощности сезонноталого слоя, на (30 ± 14) см по сравнению со средней за период 1961–1990 гг., можно ожидать на севере Западной Сибири в индустриально развитом Ямало-Ненецком округе, в то время как на большей части криолитозоны Восточной Сибири изменения составят (20 ± 10) см.

Криолитозона, моделирование, сезонноталый слой, изменчивость, вероятностно-статистический прогноз

**RUSSIAN PERMAFROST IN THE 21ST CENTURY:
MODEL-BASED PROJECTIONS AND ANALYSIS OF UNCERTAINTIES**

O.A. Anisimov, V.A. Kokorev

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

The authors study sensitivity of the model-based active layer thickness in the European and Asian Russia permafrost regions to variations in air temperature, snow depth, and vegetation patterns. The model has been used to estimate current changes of active layer thickness between the 1961–1990 and 2004–2013 periods. The calculations were performed using a scenario of coupled climatic and vegetation changes for the mid-21st century. Model calculations took into account the input data uncertainty. According to the modeling results, by mid-21st century the largest increase in the active-layer thickness (30 ± 14 cm) relative to the mean for the 1961–1990 period can be expected in the industrially developed Yamal-Nenets district of north-western Siberia. Over most of the East Siberian permafrost regions, the projected changes in the active-layer thickness are 20 ± 10 cm.

Permafrost regions, modeling, active layer thickness, variability, stochastic projection

ВВЕДЕНИЕ

В работе [Анисимов, Шерстюков, 2016] были рассмотрены факторы, определяющие динамику многолетнемерзлых грунтов (ММГ), и сделан вывод, что в наибольшей степени она обусловлена изменениями температуры воздуха и напочвенных покровов (снега и растительности). В ней получена модельная оценка изменения мощности сезонноталого слоя (СТС) в ХХІ в. Ранее такие расчеты проводились по моделям различной

сложности с использованием нескольких климатических проекций [Аржанов и др., 2013; Koven *et al.*, 2013; Slater, Lawrence, 2013]. Три принципиальных отличия данной работы в том, что использовалась оптимизированная для криолитозоны ансамблевая климатическая проекция на основе современных моделей CMIP5, были учтены изменения растительности и проведен анализ неопределенности расчета.

Расчеты содержат три типа неопределенности. Они обусловлены несовершенством моделей ММГ, неполной информацией о свойствах почвы и растительности, а также неточностью данных о современном и будущем климате. Были предприняты усилия для минимизации каждой из этих неопределенностей. Это потребовало: 1) выбора модели ММГ, уровень детализации которой соответствует обеспеченности входными данными для всей криолитозоны; 2) новой интерпретации входных климатических данных, используемых в стационарной модели ММГ промежуточной сложности; 3) применения вероятностно-статистической постановки модельных расчетов, которая учитывает естественную мелкомасштабную изменчивость влияющих на ММГ параметров; 4) тестирования климатических проекций по индивидуальным моделям CMIP5 на основе региональных критериев; 5) построения оптимизированного для криолитозоны России ансамбля лучших моделей, по которому были проведены расчеты параметров состояния и распространения ММГ для XXI в.

ВЫБОР МОДЕЛИ ММГ И ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ВЛИЯЮЩИМ ПАРАМЕТРАМ

Обзор всех типов современных моделей ММГ дан в работе [Анисимов и др., 2012]. Их можно разделить на два класса – стационарные и динамические модели. Для расчетов по динамическим моделям необходим полный набор теплофизических и влажностных характеристик на всех рассматриваемых уровнях по вертикали, в том числе для напочвенных покровов. Отсутствие таких данных для всей криолитозоны России стало решающим аргументом для выбора авторами более простой стационарной модели ММГ.

В основу стационарной модели положено представление об экспоненциальном затухании

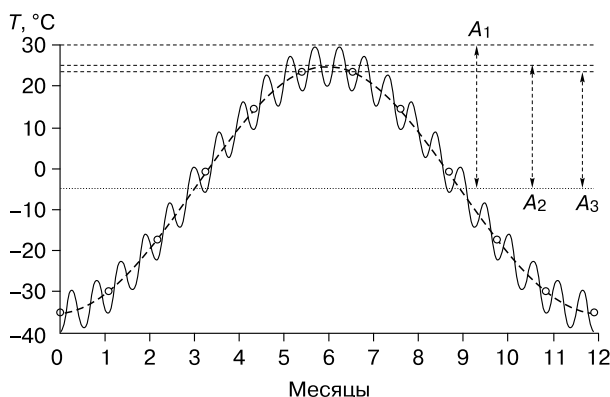


Рис. 1. Различия амплитуд годового цикла температуры, рассчитанных с использованием среднемесячных (A_3), среднесуточных (A_2) и срочных (A_1) метеорологических данных.

амплитуды годовых колебаний температуры с глубиной грунта и о балансе теплооборотов холодного и теплого периодов. Канонический алгоритм был разработан в 1974 г. [Кудрявцев и др., 1974]. В дальнейших модификациях был выполнен учет влияния снежного покрова (модель GIPL [Sazonova, Romanovsky, 2003]) и верхнего органического слоя почвы [Анисимов, 2009]. Математический формализм полностью приведен в указанных публикациях и здесь не приводится. Он сводится к тому, чтобы по заданному годовому ходу температуры воздуха последовательно рассчитать изменения амплитуды и среднегодовой температуры на глубинах за счет влияния снежного покрова, растительности и температурной сдвижки, обусловленной различием коэффициентов теплопроводности талого и мерзлого грунтов. Средняя за зиму высота снежного покрова рассчитывается по сумме атмосферных осадков, а теплофизические характеристики, осредненные по всему верхнему слою почвы, являются входными параметрами, величина которых рассчитывается по полуэмпирическим параметризациям и зависит от состава почвы и ее влажности.

Основополагающим является предположение о гармоническом виде годового температурного цикла, поэтому модель обладает высокой чувствительностью к амплитуде температуры воздуха. Она рассчитывается как полуразность между годовым максимумом и минимумом. Из рис. 1 следует, что вычисленные значения амплитуды уменьшаются при увеличении временной дискретности входных температурных данных из-за неизбежного сглаживания абсолютных максимумов и минимумов. Наименьшее значение амплитуды (A_3) получается при расчете по среднемесячным данным (температуры каждого месяца показаны точками на рис. 1). Более высокие значения (A_2 , A_1) получаются при использовании, соответственно, среднесуточных и срочных (максимальных и минимальных) данных, которые изображены в виде штриховой плавной и осциллирующей вокруг нее кривых.

Практически во всех публикациях используются среднемесячные данные о температуре воздуха, что неизбежно ведет к занижению расчетной амплитуды и мощности СТС. Анализ работ, в которых проводится сравнение расчетов с наблюдениями, указывает на наличие этой систематической ошибки (см., например, [Sazonova, Romanovsky, 2003]). Устранить ее можно, если на входе модели использовать данные о температуре воздуха меньшей дискретности.

Было проведено сравнение амплитуд годового цикла температуры воздуха, рассчитанных по данным о максимальных и минимальных за месяц величинах и по среднемесячным данным сеточно-го архива CRU TS 3.10 [Harris et al., 2014], осред-

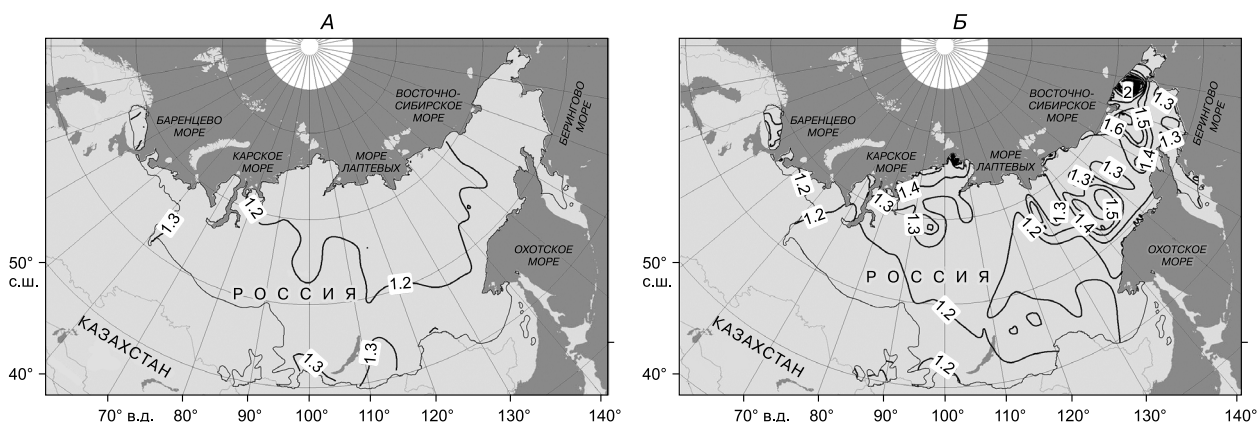


Рис. 2. Отношение годовых амплитуд температуры воздуха (А) и мощности СТС (Б), рассчитанных по среднемесячным данным и данным о максимальных и минимальных за месяц температурах воздуха, осредненным за период 1961–1990 гг.

ненным за период 1961–1990 гг. Их отношение приведено на рис. 2, А. Видно, что относительные различия уменьшаются с запада на восток и с юга на север. Отношение имеет наименьшее значение в Западной Сибири и Якутии (менее 1.2), на остальной части криолитозоны лежит в диапазоне 1.2–1.3 (см. рис. 2, А).

Возникает вопрос, какова ошибка расчета, обусловленная дискретностью входных данных. Для ее оценки была рассчитана мощность СТС для двух рассмотренных выше значений амплитуды, отношение полученных величин показано на рис. 2, Б. Сравнение рис. 2, А и Б указывает на то, что относительные различия мощности СТС имеют тот же порядок величины, что и различия амплитуд температуры, но иное пространственное распределение. На севере Европейской территории России (ЕТР) численные значения параметров, показанных на рис. 2, А, Б, практически совпадают. При перемещении на восток различия увеличиваются и достигают максимума на Чукотке и в восточных районах Якутии, за исключением Центральной и Западной Якутии, где различия невелики.

Пространственные закономерности на рис. 2, А и Б соответствуют оценке чувствительности температуры ММГ к температуре воздуха, полученной нами ранее [Анисимов, Шерстюков, 2016]. В этой публикации чувствительность характеризуется коэффициентом $K_{\text{ММГ}}$, который равен отношению трендов среднегодовых температур грунта и воздуха, рассчитанных по данным наблюдений. Было показано (см. [Анисимов, Шерстюков, 2016, рис. 4]), что коэффициент $K_{\text{ММГ}}$ имеет малую величину (0.1–0.3) на севере ЕТР, в Центральной и Западной Якутии и вдвое большую величину (0.3–0.6) в Восточной Якутии и на Чукотке. В районах с высокими значениями $K_{\text{ММГ}}$

отмечены наибольшие различия величин, приведенных на рис. 2, А, Б, поскольку относительно небольшие изменения амплитуды годового хода температуры воздуха из-за высокой чувствительности к ней ММГ вызывают изменения мощности СТС, в относительном выражении превышающие исходное возмущающее воздействие.

Можно исследовать влияние точности входных параметров на неопределенность расчетов с более общих позиций, рассматривая модель ММГ как математический оператор, трансформирующий вариации пространственно-временных полей влияющих параметров климата, растительности, снежного покрова и почвы в вариации поля СТС. Свойства модельного оператора исследовались в серии численных экспериментов, в каждом из которых варьировалось значение лишь одного параметра при фиксированных значениях остальных и оценивалась чувствительность расчетной мощности СТС к этим вариациям в соответствии с уравнением

$$\frac{\Delta Z_i}{\bar{Z}} = k_i \frac{\Delta P_i}{\bar{P}_i}, \quad (1)$$

где ΔP_i , ΔZ_i – отклонение параметра i и обусловленное этим отклонение мощности СТС от средних значений ($\bar{P}_i$ и $\bar{Z}$), отношение которых представляет собой нормированную вариацию; k_i – чувствительность расчетной мощности СТС к параметру P_i . При $k_i < 1$ модельный оператор по отношению к данному параметру является сжимающим, при $k_i \approx 1$ – нейтральным, а при $k_i > 1$ – растягивающим. Значения k_i показывают, какой вклад относительная ошибка данного параметра вносит в неопределенность расчета, причем следует учитывать два обстоятельства. Во-первых, получаемые таким методом оценки характеризуют чувствительность лишь конкретной модели ММГ. Во-вторых,

**Оценка чувствительности рассчитанной по стационарной модели мощности СТС
к вариациям влияющих параметров**

Криолито- зона	Высота		Толщина орга- нического слоя (0–20 см)	Теплопроводность (±40 % от нормы)	Амплитуда температуры (±20 % от нормы)
	снега (±50 % от нормы)	нижней раститель- ности (5–50 см)			
Европейская территория России					
Сплошная	0.11	0.16	0.17	0.47	0.38
Прерывистая и островная	0.05	0.18	0.13	0.46	0.15
Сибирь, Чукотка					
Сплошная	0.07	0.20	0.19	0.45	0.74
Прерывистая	0.09	0.18	0.13	0.45	0.22
Островная	0.09	0.19	0.12	0.46	0.14

из-за нелинейностей величина k_i зависит от того, в каких пределах изменяются исследуемые параметры. Поэтому важно следить за тем, чтобы их вариации не выходили за пределы значений, полученных в наблюдениях.

В таблице приведены значения k_i для исследуемых модельных параметров на Европейской и Азиатской территории России для сплошной, прерывистой и островной криолитозоны. На Европейской территории последние две категории были объединены, поскольку на всех существующих картах ММГ отсутствует четкая граница между ними. Расчет проводился в узлах регулярной сетки с шагом 0.5° по широте и долготе по среднемесячным данным архива CRU TS 3.10 [Harris et al., 2014], осредненным за период 1961–1990 гг. с коррекцией амплитуды годового хода температуры в соответствии с данными на рис. 2. Значения k_i осреднялись по каждой из рассматриваемых подзон. Заметим, что на рис. 2 использована другая, менее универсальная метрика – отношение двух значений амплитуды температуры, которое сравнивается с двумя значениями рассчитанной мощности СТС, в то время как данные таблицы получены сравнением вариаций этих величин, нормированных на их средние значения.

Данные таблицы подтверждают известный факт, что наибольшее влияние на мощность СТС оказывает теплопроводность почвы. Зависимость мощности СТС от типа, влажности и состояния (мерзлого или талого) почвы достаточно хорошо изучена и учитывается в моделях через соответствующие параметризации. Из остальных параметров наибольшая чувствительность СТС выявлена к температуре воздуха, причем ошибки в определении параметров растительности и органического слоя почвы в сплошной криолитозоне оказывают в 2–3 раза меньшее влияние, а в прерывистой и островной примерно одинаковое. Влияние снежного покрова повсеместно меньше, чем любого другого из рассмотренных факторов.

**ОПТИМАЛЬНАЯ АНСАМБЛЕВАЯ
КЛИМАТИЧЕСКАЯ ПРОЕКЦИЯ
ДЛЯ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ**

Безальтернативным источником данных о возможных изменениях климата в XXI в. являются гидродинамические модели земной системы, исчерпывающий обзор которых в контексте изучения криолитозоны России дан в работах [Кокорев, Анисимов, 2013; Кокорев, Шерстюков, 2015]. Для расчетов необходимы данные об эмиссии парниковых газов (ПГ), которая является главным фактором антропогенного воздействия на климат. В расчетах за исторический период (1850–2005 гг.) используются фактические данные, в прогностических расчетах – условные сценарии эмиссии ПГ для альтернативных путей развития мировой экономики [Meinshausen et al., 2011]. Сценарии получили стандартизованные обозначения и описаны в ряде публикаций: RCP8.5 [Riahi et al., 2011], RCP6 [Masui et al., 2011], RCP4.5 [Thomson et al., 2011] и RCP2.6 [van Vuuren et al., 2011]. Цифры обозначают приращение глобального радиационного баланса (Вт/м^2) к 2100 г., обусловленное соответствующими эмиссиями. Результаты модельных расчетов с использованием сценариев ПГ принято называть климатическими проекциями, чтобы подчеркнуть их условный, а не прогностический характер. Если реализуется сценарий максимальной эмиссии RCP8.5, глобальная температура может увеличиться по сравнению с современной (средней за период 2004–2013 гг.) приблизительно на 1°C до середины XXI в. и до 2.7°C к концу века, что эквивалентно увеличению на 2.0 и 3.7°C по отношению к доиндустриальному уровню 1850 г. При менее агрессивных сценариях потепление к концу века будет не столь сильным. До 2030 г. различия глобальной температуры, рассчитанной по любой модели для всех сценариев RCP, не превышают 0.2°C , при этом межмодельный разброс для любого сценария RCP вдвое больше и достигает 0.4°C [Stocker et al., 2013].

Наибольшие региональные различия проекций температуры воздуха и осадков как между моделями, так и между сценариями RCP имеют место в криолитозоне [Collins *et al.*, 2013]. В значительной степени это обусловлено сложностью процессов на подстилающей поверхности, которые не всеми моделями описываются хорошо. Неопределенность климатических проекций можно уменьшить, если исключить “худшие” модели с большой ошибкой воспроизведения исторических изменений влияющих на ММГ параметров, а остальные модели объединить в регионально оптимизированный ансамбль. Этот метод ранее нами применялся для оптимизаций климатических проекций по параметрам, определяющим динамику ледников Северного полушария [Анисимов, Кокорев, 2013], а также природных и социально-экономических систем Арктики [Анисимов, Кокорев, 2016].

Проведено тестирование 46 моделей проекта CMIP5 согласно тому, как они воспроизводят суммы градусо-дней теплого периода и годовую амплитуду температуры в криолитозоне России за период 1981–2005 гг. Использовались результаты расчетов за исторический период. Подробная информация о климатических моделях поколения CMIP5, а также методика оценки точности модельных расчетов на территории России приведены в работах [Анисимов, Кокорев, 2013, 2016; Кокорев, Анисимов, 2013; Кокорев, Шерстюков, 2015]. Были выбраны 15 моделей, ошибки которых по трендам рассматриваемых характеристик не превышали средние по всем моделям. Исчерпывающие данные оптимизированного для криолитозоны России ансамбля 15 моделей приведены на портале www.permafrost.su/gcm и здесь не рассматриваются.

ПРОЕКЦИЯ СОГЛАСОВАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА XXI ВЕК

В работе [Анисимов, Шерстюков, 2016] исследован механизм влияния растительности на ММГ; в [Жильцова, Анисимов, 2013] приведены эмпирико-статистическая модель и результаты расчетов климатообусловленного изменения границ арктических биомов в XXI в.; в [Анисимов *и др.*, 2015; Жильцова, Анисимов, 2015] на основе анализа спутниковых данных *NDVI* построена регрессионная модель, связывающая вариации биомассы в каждой из растительных зон с условиями теплообеспеченности и увлажнения. Нами использованы методы и результаты этих работ для построения проекции согласованных изменений климата и растительности на XXI в., в которой учтены как изменения растительной зональности на временных масштабах порядка нескольких десятилетий, так и изменчивость биомассы, определяемая локальными условиями в пределах каждой зоны.

Рассмотрены два исторических временных периода – фоновый (1961–1990 гг.) и современный (2004–2013 гг.), а также прогностический срез в середине XXI в. (2036–2065 гг.). Для каждого из них во всех узлах пространственной сетки, покрывающей криолитозону, были рассчитаны осредненные значения среднемесячных температур и сумм месячных осадков. На исторических срезах использовались данные архива CRU TS 3.10, на прогностических к ним добавлены приращения, определяемые оптимизированной для криолитозоны ансамблевой климатической проекцией на XXI в. со сценарием эмиссии парниковых газов RCP8.5. Эти данные далее поступали на вход модели ММГ (с корректировкой амплитуды годового хода температуры) и эмпирико-статистической модели границ растительных зон [Анисимов *и др.*, 2011], а также использовались для расчета отклонений теплофизических (теплоизолирующих) свойств растительного покрова от фоновой величины в каждой из растительных зон. Последний расчет проводился с учетом особенностей низших и высших форм растительности, различия которых заключаются в следующем.

Теплофизические свойства мохово-лишайниковой растительности близки к торфу, и ее можно рассматривать как дополнительный верхний горизонт органического слоя почвы, свойства которого зависят от состава слагающих его растений, толщины и влагосодержания. Немногочисленные опубликованные данные позволяют приблизительно оценить теплофизические свойства мохово-лишайниково-торфяного покрова в мерзлом и талом состоянии для различных условий увлажнения. Сомкнутость и биомасса низшей растительности, определяющие ее теплоизолирующие свойства, зависят от теплообеспеченности, рассчитываемой по данным о температуре воздуха. В природных зонах, где отсутствуют высшие растения (полярная пустыня, северная тундра), используются регрессионные зависимости, связывающие толщину дополнительного органического слоя почвы с температурой воздуха и суммами осадков теплого периода года, а теплофизические характеристики – с суммами осадков. Сам слой при этом объединяется с органическим горизонтом почвы в единую однородную по свойствам среду.

Высшие сосудистые растения (граминоиды, кустарнички и кустарники) сильнее реагируют на изменения климата, в первую очередь теплообеспеченности, меняя фитомассу, которая определяет теплоизолирующее воздействие на почву. Это интерпретируется как изменение индекса покрытия, или “эффективной высоты” растительности, при фиксированных значениях объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности и учитывается через регрессионную зависимость. Рассчитанная таким образом эффективная высота

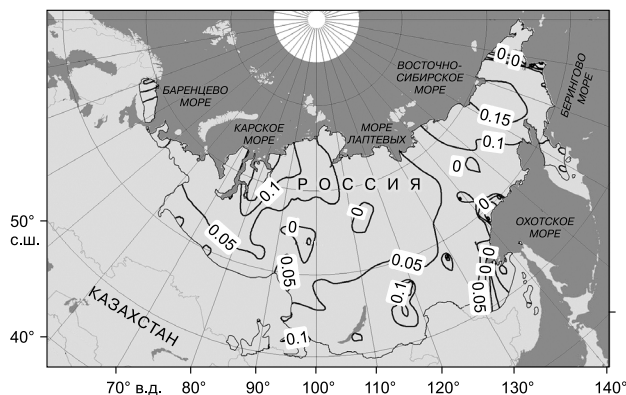


Рис. 3. Расчетные аномалии среднегогодовой мощности СТС (м) за период 2004–2013 гг. по сравнению с нормой 1961–1990 гг.

задается явно в виде параметра модели ММГ. Оценки чувствительности модели ММГ к вариациям параметров низшей (учитываемой в модели как часть верхнего органического слоя почвы) и высшей (учитываемой через высоту) форм растительности приведены в таблице.

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ И БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ МОЩНОСТИ СТС

В научной литературе, посвященной климатообусловленным изменениям ММГ, отсутствует четкое определение того, какой период следует рассматривать в качестве фонового. Многие гео-криологические карты построены на основе данных наблюдений 1960–1970-х гг. в период стабильного климата. Получившее широкое распространение цифровое картирование мерзлоты на основе модельной ассимиляции наблюдений и последующей экстраполяции опирается на данные за более поздние интервалы времени, когда ММГ начали испытывать воздействие потепления. Для

того чтобы можно было сравнивать гео-криологические данные за различные временные интервалы, мы провели расчет мощности СТС для современного периода 2004–2013 гг. и для периода 1961–1990 гг., принятого за фоновый. Как и ранее, использовались климатические данные сеточного архива CRU TS 3.10. Рассчитанные изменения мощности СТС приведены на рис. 3. Можно отметить выраженную секторальную картину современных изменений ММГ, выделив две области на Гыданском полуострове и на востоке Колымской низменности, где среднегодовая мощность СТС увеличилась на 15–20 см, в то время как на большей части криолитозоны изменения не превышали 10 см.

Проверка и калибровка использованной в расчетах модели на современных данных была описана в [Анисимов, 2009]. В данной работе эта модель применена для расчета изменений мощности СТС к середине XXI в. Была использована проекция согласованных изменений климата и растительности для сценария эмиссии парниковых газов RCP8.5. Для оценки неопределенности результатов применялась вероятностно-стохастическая схема расчета [Анисимов, 2009]. Не повторяя выкладок указанной работы, отметим, что по данной схеме в каждой ячейке пространственной сетки проводится несколько расчетов с различными комбинациями варьируемых вокруг средних значений параметров, описывающих свойства снежного покрова, растительности и почвы. Такой набор расчетов выполняется отдельно по каждой из 15 климатических проекций оптимального ансамбля, после чего рассчитанная выборка исследуемой величины подвергается стандартной статистической обработке, в ходе которой рассчитываются ее среднее, стандартная ошибка, дисперсия и плотность распределения.

В настоящей работе мы приняли во внимание, что входные климатические данные оказывают

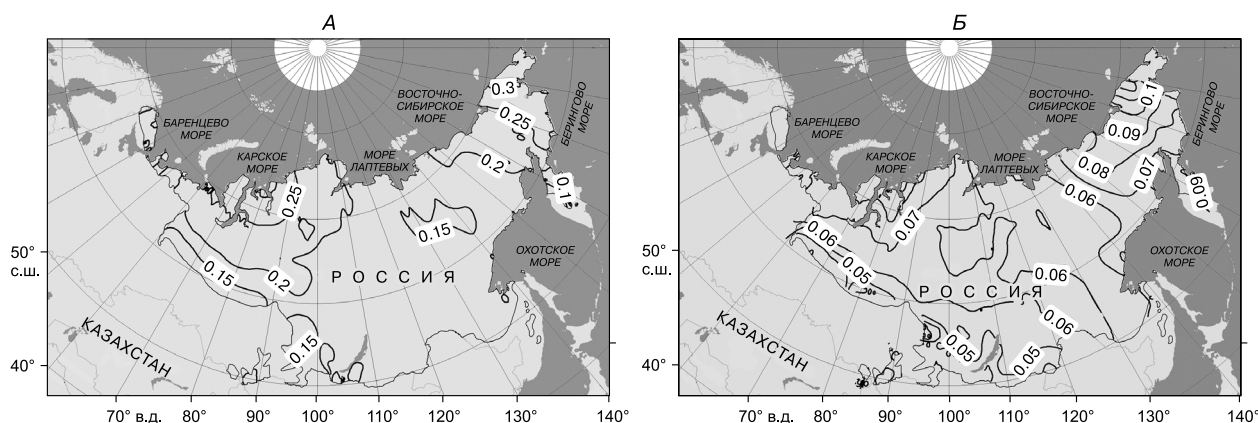


Рис. 4. Расчетные аномалии среднегогодовой мощности СТС (м) за период 2036–2065 гг. по сравнению с нормой 1961–1990 гг. (А) и их стандартные отклонения (Б).

наибольшее влияние на неопределенность расчетов. Поэтому в серии численных экспериментов варьировались лишь климатические проекции. Для формирования статистической выборки в каждой точке проводилось 15 расчетов с различными климатическими данными при фиксированных значениях остальных теплофизических, почвенных и растительных параметров.

Для сплошной и прерывистой криолитозоны толщина органического слоя задавалась равной 10 и 15 см соответственно, высота наземной растительности (злаково-кустарниковой) – 20 и 50 см, теплофизические характеристики минерального грунта повсеместно соответствовали супеси при типичных для криолитозоны значениях влажности. Для уменьшения влияния на результат возможных ошибок задания неклиматических параметров анализировались не сами рассчитанные значения СТС, а их изменения по сравнению с фоновой среднегодовоей величиной для каждой ячейки сетки. На рис. 4, А приведены средние значения прогнозируемых изменений мощности СТС, на рис. 4, Б – их стандартные отклонения. В совокупности эти данные позволяют определить доверительный интервал полученных оценок, характеризующий неопределенность расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать несколько выводов о точности перспективных модельных оценок состояния криолитозоны России в условиях изменения климата. Первый состоит в том, что повсеместно используемые климатические проекции по моделям последнего поколения CMIP5 вносят наибольший вклад в неопределенность геоэкологических прогнозов, уменьшить которую можно, исключив из рассмотрения модели с большой ошибкой воспроизведения полей температуры и осадков в криолитозоне. Разработанный для этого алгоритм описан в ряде публикаций, а полученные данные по оптимизированному для криолитозоны России ансамблю моделей размещены на портале www.permafrost.su/gcm.

Второй вывод касается прогноза состояния ММГ. На большей части криолитозоны Восточной Сибири к середине XXI в. прогнозируются небольшие изменения среднегодовоей мощности СТС на (20 ± 10) см (здесь и далее указан 95%-й доверительный интервал, полученный комбинацией данных на рис. 4, А и Б). Наибольшее увеличение СТС на (30 ± 14) см, по данным расчетов, может произойти на севере Западной Сибири в Ямало-Ненецком округе. Это район интенсивного освоения запасов углеводородов, в котором планируется дальнейшее развитие существующей и создание новой инфраструктуры. Уже сейчас решение этой задачи осложнено множеством инже-

нерно-строительных проблем, которые к середине XXI в. лишь увеличатся. Дополнительные сложности связаны с наличием в районе переохлажденных минерализованных и засоленных грунтов (криопэггов), влияние которых не было учтено в расчетах.

И наконец, главный вывод состоит в том, что модели криолитозоны различного уровня детализации дают возможность получать значимые оценки будущих изменений параметров ММГ в XXI в., диапазон неопределенности которых, составляющий сейчас около 50 %, будет уменьшаться по мере совершенствования климатических моделей и увеличения их точности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-17-00037).

Литература

- Анисимов О.А.** Вероятностно-статистическое моделирование мощности сезонноталого слоя в условиях современного и будущего климата // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 3, с. 36–44.
- Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А. и др.** Континентальная многолетняя мерзлота // Методы изучения последствий изменений климата для природных систем / Под ред. С.М. Семенова. М., ВНИИГМИ, 2012, с. 268–328.
- Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Разживин В.Ю.** Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса, 2015, № 3, с. 60–70.
- Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренева С.А.** Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России // Метеорология и гидрология, 2011, № 11, с. 31–42.
- Анисимов О.А., Кокорев В.А.** Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу // Лед и снег, 2013, т. 121, № 1, с. 83–92.
- Анисимов О.А., Кокорев В.А.** Климат в арктической зоне России: анализ современных изменений и модельные проекции на XXI век // Вестн. МГУ, 2016, № 1, с. 61–69.
- Анисимов О.А., Шерстюков А.Б.** Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 2, с. 90–99.
- Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И.** Влияние климатических изменений над сушей внетропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI в. по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН // Метеорология и гидрология, 2013, № 7, с. 31–42.
- Жильцова Е.Л., Анисимов О.А.** Эмпирико-статистическое моделирование растительной зональности в условиях изменения климата на территории России // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем / Под ред. Ю.А. Израэля. М., Планета, 2013, вып. 25, с. 360–374.
- Жильцова Е.Л., Анисимов О.А.** Динамика растительности Северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на 21 век // Арктика XXI век. Естеств. науки, 2015, № 2 (3), с. 48–59.

- Кокорев В.А., Анисимов О.А.** Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем / Под ред. Ю.А. Израэля. М., Планета, 2013, вып. 25, с. 131–153.
- Кокорев В.А., Шерстюков А.Б.** О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России // Арктика XXI век. Естественные науки, 2015, № 2 (3), с. 5–23.
- Кудрявцев В.А.** Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / В.А. Кудрявцев, Л.С. Гарагуля, К.А. Кондратьева, В.Г. Меламед. М., Наука, 1974, 431 с.
- Collins M., Knutti R., Arblaster J. et al.** Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin et al. (eds.). Cambridge, UK; N.Y., USA, Cambridge Univ. Press, 2013, p. 1029–1136.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.** Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // Intern. J. Climatology, 2014, vol. 34, No. 3, p. 623–642.
- Koven C.D., Riley W.J., Stern A.** Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth System Models // J. Climate, 2013, No. 26, p. 1877–1900.
- Masui T., Matsumoto K., Hijioka I. et al.** An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing // Climatic Change, 2011, vol. 109, No. 1–2, p. 59–76.
- Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K. et al.** The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Ibid., p. 213–241.
- Riahi K., Rao S., Krey V. et al.** RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // Ibid., p. 33–57.
- 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.
- Slater A.G., Lawrence D.M.** Diagnosing present and future permafrost from climate models // J. Climate, 2013, vol. 26, p. 5608–5623, DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00341.1.
- Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K. et al.** Technical Summary // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK; N.Y., USA, Cambridge Univ. Press, 2013, p. 33–115.
- Thomson A.M., Calvin K.V., Smith S.J. et al.** RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 // Climatic Change, 2011, vol. 109, p. 77–94.
- van Vuuren D.P., Stehfest E., den Elzen M.G.J. et al.** RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C // Climatic Change, 2011, vol. 109, p. 95–116.
- <http://www.permafrost.su/gcm.html>

Поступила в редакцию
9 декабря 2015 г.