

М.В. Кабанов<sup>1</sup>, В.Н. Лыкосов<sup>2</sup>

## Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири

<sup>1</sup> *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск*

<sup>2</sup> *Институт вычислительной математики РАН, г. Москва*

Поступила в редакцию 25.04.2006 г.

Дается обзор выявленных за последние годы эмпирических закономерностей по результатам статистической обработки накопленных инструментальных данных. Среди этих закономерностей: тренды и траектории наблюдаемого потепления в Сибири, межсезонные колебания приземной температуры, временные периодичности потепления в разных городах Сибири. С другой стороны, обсуждаются возможности использования современных математических моделей климата для описания региональных природно-климатических изменений. К обнадеживающим результатам математического моделирования относятся: воспроизведение региональной приземной температуры с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана, оценка региональных последствий глобального потепления, учет региональных гидрологических процессов. Отмечается перспективность объединения двух методологических подходов (эмпирического и математического моделирования), а также необходимость преодоления ряда нерешенных проблем при таком объединении.

### Введение

На Международной конференции в 1972 г. академик М.И. Будыко впервые высказал основанное на его расчетах и смутившее специалистов мнение, что вместо ожидаемого тренда похолодания в ближайшие годы должна проявиться тенденция к глобальному потеплению [1]. А в 1992 г. на Конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро наблюдаемые природно-климатические изменения под воздействием природных и антропогенных факторов уже были признаны угрожающими для развития цивилизации [2]. Решения этой Конференции ООН, подписанные тогда многими присутствующими главами государств и правительств, в значительной мере стимулировали научные исследования по окружающей среде и климату на планете в рамках разработанных международных, национальных и региональных программ.

Результаты дальнейших научных исследований по глобальным и региональным природно-климатическим изменениям привели к выводам о том, что необходим более детальный учет региональных особенностей [3], а взаимосвязанные изменения различных компонентов системы Земля не поддаются объяснению в рамках простой парадигмы «причина—следствие» (Амстердамская декларация — 2001 [4]). Наиболее краткая и емкая формулировка, учитывающая новые методологические принципы исследований: «интегрированные региональные исследования», которые в рамках Международной геосферно-биосферной программы были объявлены в 2002 г. стратегическим направлением для дальнейших мультидисциплинарных исследований [5].

Новые методологические принципы легли на подготовленную почву для дальнейших исследований в Сибирском регионе. Дело в том, что еще в 1993 г. по инициативе академика В.А. Коптюга (тогда Председателя Сибирского отделения РАН), принимавшего участие в подготовительном процессе и работе Конференции ООН в Рио-де-Жанейро, были организованы мультидисциплинарные исследования в рамках регионального проекта «Климато-экологический мониторинг Сибири» (координатор чл.-кор. РАН М.В. Кабанов). Сформулированная тогда концепция комплексного регионального мониторинга, сгруппированная инструментальная база для натурных наблюдений и некоторые результаты исследований были описаны в серии монографий под общим названием «Региональный мониторинг атмосферы» [6].

Дальнейшая разработка научных и технологических основ мониторинга, моделирования и прогнозирования региональных климатических и экосистемных изменений под воздействием природных и антропогенных факторов стала целевой задачей Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН. По существу формулировка этой задачи уже учитывает основные методологические принципы «интегрированных региональных исследований», а первые же результаты исследований показали необходимость их сопоставления с имеющимися математическими моделями климата, которые с достаточной точностью учитывают и описывают глобальные климатообразующие процессы.

В свою очередь современные математические модели климата (см., например, [7]), в отличие от

ряда предшествовавших (в частности, [8]), рассматривают согласно определению Всемирной метеорологической организации климатическую систему планеты Земля как глобальную систему, образованную такими взаимодействующими между собой компонентами, как атмосфера, океан, суша, криосфера и биота [9]. Математически климат при этом определяется как статистический ансамбль состояний, принимаемых климатической системой за достаточно большой интервал времени (~ 30 лет) и характеризующихся большим, но конечным множеством параметров. На первый взгляд представляется, что сопоставление таких глобальных математических моделей климата с результатами инструментального мониторинга на ограниченных отрезках времени является проблематичным. Однако за последние годы и здесь появились обнадеживающие перспективы.

В Институте вычислительной математики РАН создана математическая модель климата [7], основанная на глобальных моделях общей циркуляции атмосферы и океана и на точном описании всех физических процессов, участвующих в формировании климата. Апробация разработанной модели с целью воспроизведения современного климата подтвердила ее конкурентоспособность с другими моделями (около 30), разработанными в разных странах мира и участвующими в международных программах сравнения климатических моделей. По мере совершенствования вычислительных средств и самих моделей климата существенно расширяются их возможности для исследования актуальных региональных проблем климатической изменчивости, в том числе с использованием эмпирических данных, накопленных в отдельных регионах, включая Сибирь.

Таким образом, экспериментальные исследования реальной климатической системы (мониторинг) и теоретические исследования глобальной климатической системы (математическое моделирование) вышли на новый переломный этап совместных исследований. Для развития таких исследований необходимы построение обоснованной иерархии взаимодействующих между собой подсистем в составе глобальной климатической системы и уточнение описания происходящих в них физических процессов. Среди подобных подсистем с разными масштабами пространственно-временных вариаций особое место занимают техногенные системы, роль которых на количественном уровне пока достоверно не выявлена. Задача данной публикации состоит в том, чтобы на примере некоторых конкретных результатов проиллюстрировать стартовые позиции двух научных подходов к решению общей проблемы, связанной с наблюдаемыми глобальными и региональными климатическими изменениями под воздействием природных и антропогенных факторов.

### **Эмпирические закономерности потепления**

Природные и климатические изменения в Сибири представляют особый интерес в свете гло-

бальных изменений системы планеты Земля. Этот особый интерес связан с рядом фактических обстоятельств.

Во-первых, обширная континентальная территория Сибири (около 10 млн км<sup>2</sup>) является неоспоримо весомым природно-территориальным регионом Евразийского континента и отличается разнообразным сочетанием климатообразующих факторов.

Во-вторых, на значительной части территории Сибири расположены лесные и водно-болотные угодья, которые играют планетарно значимую климаторегулирующую роль за счет процессов эмиссии и аккумуляции основных парниковых газов (СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub> и др.).

В-третьих, разнообразие климатических зон Сибири и наличие мезомасштабных районов с предельно высокой или совсем отсутствующей техногенной нагрузкой создают беспрецедентные на планете условия для научных исследований современных природных и климатических изменений, а также для выявления весовой роли природных и антропогенных факторов в наблюдаемых изменениях.

Отмеченные и некоторые другие региональные особенности Сибири являются безусловно важным основанием для интегрированных региональных исследований в этом регионе планеты. Но еще более важным основанием для таких исследований являются факты, свидетельствующие о повышенных темпах наблюдаемого потепления в этом регионе и последствиях этого потепления для природной среды. Ниже обсуждаются результаты анализа масштабов и выявленных закономерностей этих изменений в Сибири. При этом в предлагаемом обзоре результатов, полученных за последние годы, предпринята попытка обсудить не только выявленные эмпирические закономерности, но и те методологические проблемы исследований, которые следуют из уже полученных результатов.

### ***Линейные тренды и траектории потепления***

Обсуждение результатов анализа по темпам потепления в Сибири начнем с итогов расчета линейных трендов для среднегодовых температур за период с 1965 по 2000 г. Среднегодовые температуры рассчитывались по данным сайта NCDC (Эшвилль, США, <http://www.ncdc.noaa.gov>) для приземной температуры (ряды среднемесячных температур на высоте 2 м по 223 метеостанциям Сибири). Подробное изложение методики и некоторых результатов вычислений изложено в [10].

На рис. 1 из [10] приведена карта пространственного распределения величины линейного тренда для среднегодовой приземной температуры на территории Сибири. Изолинии на этой карте потепления выделяют районы с разной величиной тренда (разная степень зачернения) через 0,1 °С потепления за десять лет. Изолинии нанесены с погрешностью интерполяционных процедур.

Как видно из рис. 1, на всей территории Сибири темпы потепления во второй половине XX в. были достаточно высокими (более 0,2 град/10 лет),

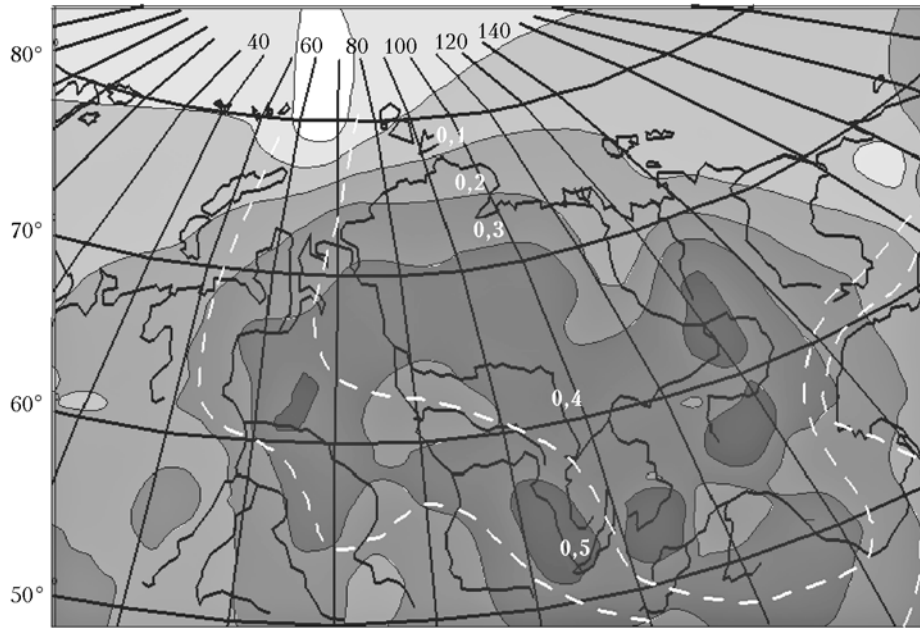


Рис. 1. Карта линейных трендов среднегодовой приземной температуры за период 1965–2000 гг. Штриховые кривые – изолинии среднемесячной температуры в январе за период 1881–1935 (верхняя для  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , нижняя для  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

а в отдельных районах достигли величины линейного тренда  $0,5\text{ град}/10\text{ лет}$ . Эти мезомасштабные по размерам районы, которые можно назвать очагами ускоренного потепления, сосредоточены прежде всего в Восточной Сибири. Если сравнить карту потепления на рис. 1 с климатическими картами предыдущих десятилетий [11], то прослеживается тенденция к восстановлению отсутствующей в те десятилетия широтной зональности климата на территории Сибири. Об этом свидетельствуют приведенные на рис. 1 изолинии (штриховые линии) среднемесячных температур для января за период 1881–1935 гг., которые разделяют районы Сибири на более холодные (к северу от изолиний) и более теплые (к югу от изолиний) и которые существенно отклоняются от широтной зональности в этот период.

Приведенная выше карта потепления в Сибири дает приближенное представление о межгодовых изменениях приземной температуры, так как при расчетах линейных трендов не учитываются различные темпы потепления в разные годы. Наиболее наглядный и не искаженный сглаживающим осреднением способ выявления различных темпов потепления в отдельные годы состоит в простом суммировании среднемесячных температур. Тогда получаются температурные траектории, которые представлены на рис. 2 из [12] для двух городов Сибири. По оси ординат здесь отложены суммы среднемесячных температур  $\sum T_M$ , где  $T_M$  в градусах Цельсия, а по оси абсцисс – годы (и месяцы). В такой системе координат наклон траектории показывает темпы потепления, а колебательная структура внутри каждого года характеризует масштабы межсезонных колебаний приземной температуры.

Из рассмотрения представленных на рис. 2 и многих других (для различных метеостанций Си-

бири) температурных траекторий следуют два принципиальных факта. Один из них состоит в том, что для всех рассмотренных метеостанций температурные траектории близки к параболическому виду, соответствующему линейному тренду межгодовых изменений, но не являются гладкими (монотонными). Немонотонный характер траекторий на рис. 2 указывает на временную неоднородность темпов потепления в прошедшее столетие.

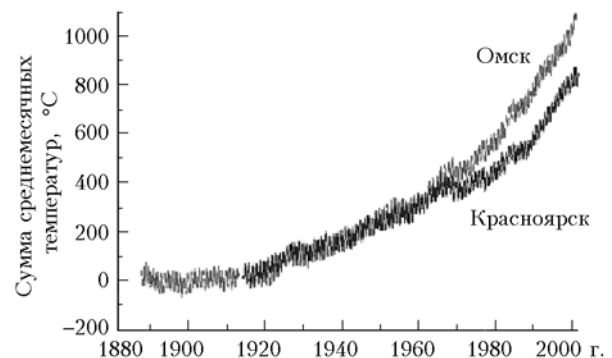


Рис. 2. Эволюционные траектории приземной температуры

Другой факт следует из сравнения траекторий для двух городов, представленных на рис. 2. Эти траектории совпадают до 70-х гг. XX в., когда они почти скачкообразно разошлись, а затем снова стали параллельными. Учитывая, что именно в 1970 г. завершилось заполнение большого Красноярского водохранилища (площадь  $2000\text{ км}^2$ , объем  $73\text{ км}^3$  [13]), можно сделать вывод о достаточной чувствительности температурных траекторий к столь крупным географическим событиям антропогенного происхождения. Вместе с тем из подобия приведенных двух траекторий до и после отмеченного

события следует, что наблюдаемые долговременные тренды потепления обусловлены общими для Сибирского региона факторами.

### Межсезонные колебания температуры

Обсужденные выше результаты анализа с помощью осредненных по времени параметров (среднегодовых и среднемесячных) относятся лишь к одной стороне наблюдаемых региональных изменений температурного режима. Не менее важной стороной для характеристики этих изменений является динамика межсезонных колебаний температуры. Амплитуда таких колебаний даже по среднемесячным температурам в отдельных районах Сибири превышает 10% от среднегодовой температуры (в кельвинах). Поэтому по сравнению с наблюдаемыми межгодовыми изменениями, которые составляют сотые доли процентов от среднегодовой температуры (в кельвинах), наблюдаемые межсезонные колебания температуры выглядят гигантскими.

Зависимость между амплитудой межсезонных колебаний приземной температуры  $A_T$  и среднегодовой температурой была получена по результатам обработки инструментальных данных метеостанций северного полушария для нескольких последних десятилетий [12]. Величина  $A_T$  определялась как усредненная по годам половинная разность среднемесячных температур между наиболее теплыми и холодными месяцами для каждой метеостанции. Достаточно высокий коэффициент корреляции (0,87) между величиной  $A_T$  и среднегодовой температурой  $T$  послужил основанием для аппроксимации выявленной зависимости, которая с приемлемой точностью близка к линейной и описывается формулой

$$A_T = \alpha(300 - T), \quad (1)$$

где  $T$  в кельвинах, а величина  $\alpha$  для северного полушария равна  $0,56 \pm 0,04$ . В Сибирском регионе величина  $\alpha$  имеет довольно широкий диапазон для разных климатических зон, что указывает на более высокую по сравнению с межгодовыми изменениями чувствительность межсезонных колебаний температурного режима к мезомасштабным особенностям.

Другой важной характеристикой, интегрально описывающей межсезонные колебания температуры, является отношение средних температур для теплого и холодного периодов года. Особый интерес к этой характеристике, описывающей полугодовые изменения климата, связан с тем, что теплый период года (май–октябрь в северных широтах) охватывает вегетационный период, во время которого климатические и экологические системы взаимодействуют наиболее активно. Кроме того, климатические характеристики именно вегетационного периода обычно реконструируют с помощью многих известных методов при палеоисследованиях [14], которые являются безальтернативными при изучении истории климата на Земле в прошедшие тысячелетия. Поэтому анализ полугодовых характеристик и их изменений за последние десятилетия,

обеспеченных прямыми инструментальными наблюдениями, является необходимым для обоснованного сопоставления с результатами палеоисследований.

На рис. 3 из [15] в координатах сумм  $Z_s$  среднесуточных температур за теплый период года (по срокам устойчивого перехода среднесуточных температур через  $0^\circ\text{C}$ ) по оси ординат, а также сумм  $Z_w$  за холодный период года по оси абсцисс представлена динамика температурного режима в трех различных географических районах Сибири (Омск, Ханты-Мансийск, Туруханск). Для наглядности стрелками показана последовательность годов. Иллюстрируемым диапазоном годов (1966–1974 гг.) выбран тот, в котором удалось заметить общую закономерность по большинству метеостанций.

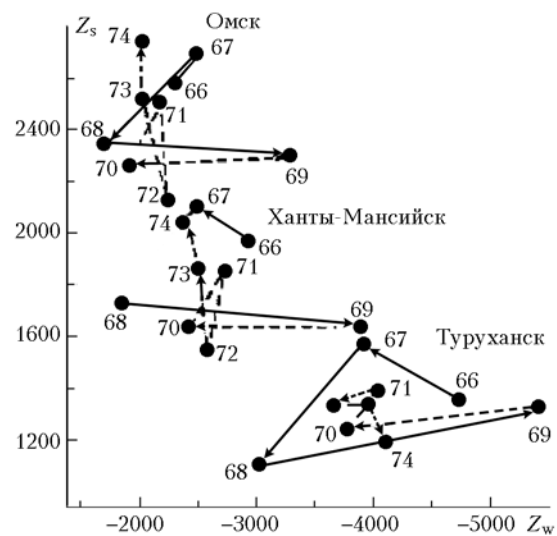


Рис. 3. Траектории изменения температурного режима для городов Сибири

Как видно из рис. 3, изменения температурного режима в эти годы для указанных метеостанций происходили сходным образом: до 1969 г. в выбранных координатах вектор изменений описал треугольник против часовой стрелки, а затем траекторию с обратным ходом. Такое поведение направления вектора изменений можно интерпретировать как возвратное колебание региональной климатической системы в эти годы.

Выявленное подобие синхронных межгодовых изменений температурного режима для разных климатических зон Сибири в период колебания можно описать моделью с разделением временных  $t$  и пространственных  $r$  переменных [16]. Обозначая отношение сумм среднесуточных температур через  $y(r, t) = Z_s/Z_w$ , для межгодового приращения  $\Delta y(r, t)$  можно записать

$$\Delta y(r, t) = a(r)\Delta b(t), \quad (2)$$

где  $a(r)$  – масштаб приращения  $y(r, t)$  для климатической зоны, удаленной на расстояние  $r$  от базовой;  $\Delta b(t)$  – межгодовые приращения  $y(r, t)$  для базовой климатической зоны.

Таким образом, как и межсезонные колебания температурного режима, полугодовые изменения отношения  $y(r, t)$  имеют высокую чувствительность к мезомасштабным особенностям в регионе. Вместе с тем для различных мезомасштабных климатических зон имеются и общие закономерности за периоды в несколько лет. Для более детального изучения таких закономерностей необходимы иные и более эффективные методы статистического анализа временных рядов для различных параметров климатических систем.

### Временные периодичности потепления

К числу эффективных методов статистического анализа при выявлении возможных периодичностей во временных рядах относится метод, основанный на вейвлет-преобразовании [17–19]. В отличие от Фурье-преобразования, обеспечивающего получение спектра временных частот в анализируемом временном ряде, вейвлет-преобразование с использованием солитоноподобной функции (вейвлета) обеспечивает выявление статистически значимых периодичностей во временном ряде. Ниже обсуждаются результаты применения вейвлет-преобразования к количественному анализу временных рядов среднегодовой приземной температуры для выявления тех периодичностей, которые качественно усматриваются по временным неоднородностям темпов потепления (см. рис. 2).

Для дискретного временного ряда коэффициенты вейвлет-преобразования  $W_k(s)$  определяются по формуле [18]:

$$W_k(s) = \sum_n^{N-1} X_n \Psi^* \left[ \frac{(k-n)\Delta t}{s} \right], \quad (3)$$

где  $X_n$  – величина среднегодовой температуры в году  $n$ ;  $\Psi^* \left[ \frac{(k-n)\Delta t}{s} \right]$  – комплексно сопряженная вейвлет-функция (в нашем случае вейвлет Морле);  $s$  – масштаб периодичности;  $k$  – смещение по временной оси;  $\Delta t$  – временной интервал между соседними значениями  $X_n$  (в нашем случае 1 год). Ограничения метода по выявляемым масштабам временных периодичностей определяются так называемым треугольником достоверности [17]. При длине временного ряда  $t$  максимальный достоверный масштаб периодичностей не превышает  $t/2\sqrt{2}$  (при длине ряда в 100 лет максимальный достоверный масштаб не более 30 лет). Минимальный достоверный масштаб периодичностей в 2–3 раза больше дискретности временного ряда  $\Delta t$  (при дискретности в 1 год минимальный масштаб более 2–3 лет).

На рис. 4 из [19] приведены примеры вейвлет-преобразования временных рядов среднегодовой температуры для ряда городов Сибири. Более темные пятна соответствуют более высоким абсолютным значениям коэффициентов  $|W_k(s)|$ , а наблюдаемые изменения масштабов и яркости этих пятен соответствуют изменениям масштабов периодичностей и темпов потепления. Анализ картин распре-

деления  $|W_k(s)|$  для приведенных и других городов Сибири показывает, что наряду с имеющимися различиями в выявляемых временных периодичностях для разных городов наблюдаются и общие закономерности. Главная из них состоит в том, что для всех городов масштабы периодичностей в последнее столетие постепенно эволюционируют. Этот факт, выявляемый с помощью вейвлет-преобразования температурных рядов, не имеет пока однозначной интерпретации, но свидетельствует о возрастающей роли общего фактора потепления для всего региона.

Количественная оценка по закономерностям выявленных периодичностей следует из корреляционного анализа темпов потепления для различных масштабов температурных периодичностей и их сравнения с планетарными индексами. В качестве таких планетарных индексов могут служить индекс Южных колебаний SOI (разность давлений в пунктах Дарвин и Таити) и индекс Северо-Атлантических колебаний NAO (разность давлений в пунктах Лиссабон и Стиккисхоульмюр), а также числа Вольфа  $W$ , характеризующие солнечную активность. По избранному данным из [20] в таблице приведены коэффициенты корреляции для температурных периодичностей разных масштабов в некоторых городах Сибири ( $K_O$  – Омск,  $K_T$  – Томск,  $K_K$  – Красноярск,  $K_{И}$  – Иркутск), а также для периодичностей планетарных индексов с масштабом в 30 лет.

Коэффициенты корреляции для периодичностей температуры и планетарных индексов

Характеристика	Периодичность	$K_O$	$K_T$	$K_K$	$K_{И}$
Среднегодовая температура	5	1	0,85±0,38	0,61±0,49	0,30±0,57
	11	1	0,88±0,37	0,72±0,44	0,67±0,46
	22	1	0,89±0,36	0,70±0,45	0,59±0,49
	30	1	0,97±0,32	0,74±0,43	0,95±0,33
SOI	30	0,3±0,6	0,3±0,5	0,8±0,4	0,4±0,5
NAO	30	0,7±0,3	0,6±0,4	0,7±0,3	0,4±0,4
W	30	0,8±0,4	0,7±0,4	0,7±0,4	0,7±0,4

Как видно из таблицы, наблюдается закономерный рост коэффициентов корреляции для разных городов Сибири с ростом масштаба температурных периодичностей. Иначе обстоит дело с индексами атмосферной циркуляции SOI и NAO, для которых коэффициенты корреляции для всех приведенных городов имеют большую дисперсию. Более того, анализ подобных коэффициентов корреляции для соседних пунктов наблюдения показывает [20], что они имеют значительный разброс вплоть до смены знака для некоторых соседних пунктов. Относительно устойчивый характер имеет корреляция температурных периодичностей с числом Вольфа, что указывает на определенную связь температурного режима с солнечной активностью. Но и в этом случае говорить о значимой связи этих коррелирующих характеристик преждевременно, так как коэффициенты корреляции для масштабов более регулярных периодичностей числа Вольфа в 11 и 22 года с температурными периодичностями таких же масштабов оказываются заметно ниже, чем для масштаба в 30 лет.

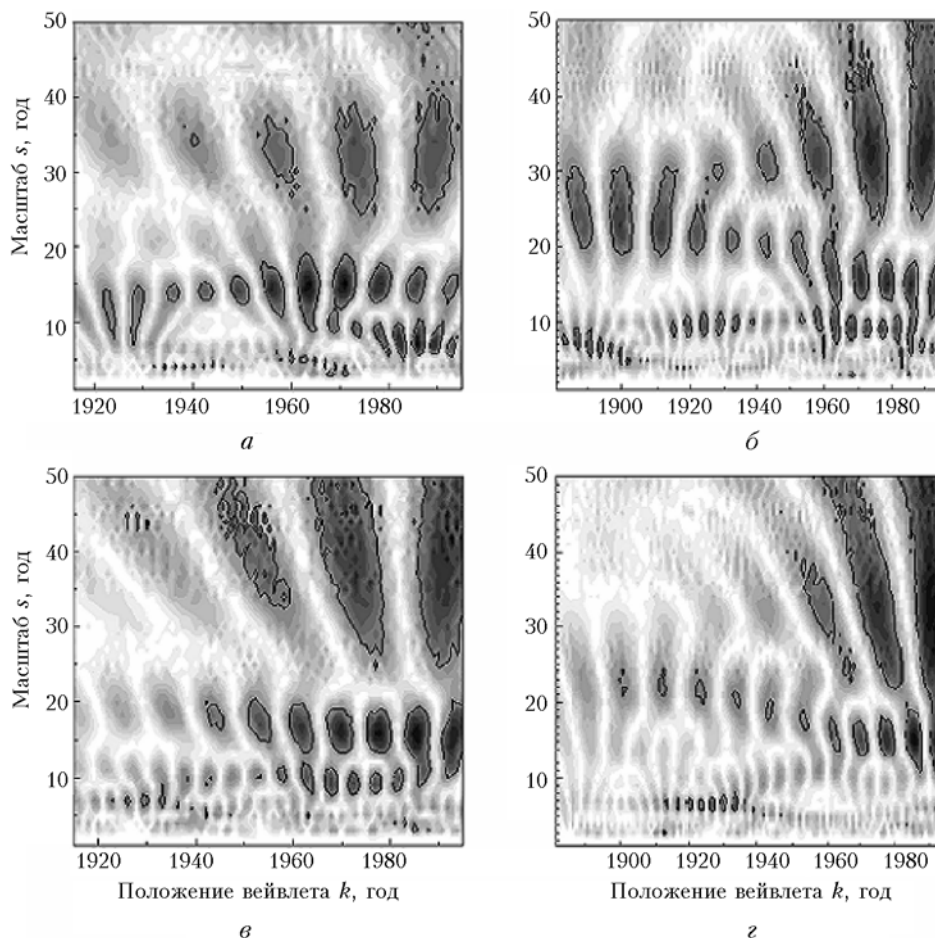


Рис. 4. Распределение коэффициентов вейвлет-преобразования  $|W_k(s)|$  для некоторых городов Сибири (*а* – Омск, *б* – Томск, *в* – Красноярск, *г* – Иркутск)

Таким образом, выполненный вейвлет-анализ рядов среднегодовых температур позволил выявить статистически значимые температурные периодичности и их эволюцию в последнее столетие. Но слабая корреляционная связь этих периодичностей и таких же по масштабам периодичностей для некоторых планетарных индексов (см. таблицу) не дает оснований для однозначных заключений. По-видимому, поиск статистически значимых корреляций необходимо вести, оперируя не только с глобальной циркуляцией атмосферы и океана, но и с региональными режимами атмосферной циркуляции. Такой методологический вывод не противоречит результатам анализа по динамике годовой суммы осадков на территории России и соседних стран в XX в. [21] и по тесно связанной с ними динамике грозовой активности на территории Западной Сибири и на соседних территориях [22].

### Регионализация математических моделей климата

При моделировании глобального климата требуется воспроизвести широкий спектр его характеристик: сезонные и месячные средние, внутрисе-

зонную изменчивость (муссонный цикл, параметры шторм-треков и т.п.), климатическую изменчивость (ее доминирующие моды, такие как явление Эль-Ниньо или Арктическое колебание) и др. Вместе с тем в настоящее время актуальным является использование современных математических моделей для изучения региональных климато-экологических особенностей, в частности Сибири. Это связано с тем, что согласно современным представлениям природная среда в средних и высоких широтах Северного полушария наиболее чувствительна к наблюдающимся глобальным изменениям климата. К числу основных задач моделирования регионального климата следует отнести воспроизведение с высокой степенью детализации его характеристик, исследование особенностей гидрологического цикла, оценку возможности экстремальных явлений, исследование последствий региональных климатических изменений для окружающей среды и социально-экономических отношений.

Совместное использование экспериментальных данных и результатов математического моделирования представляется наиболее целесообразным как для оценки текущего состояния климатической системы, так и для прогноза ее будущей эволюции

с помощью верифицированных моделей климата. Вместе с тем имеется следующее обстоятельство, связанное с пространственными масштабами исследуемой системы. При математическом моделировании глобальной климатической системы возникает проблема параметризации процессов подсеточных масштабов, что предполагает необходимость исследования ее региональных (главным образом, по видимому, мезомасштабных) особенностей. С другой стороны, результаты эмпирического моделирования, основанного на инструментальных данных по ограниченной территории, часто отягощены ее микромасштабными особенностями и не выявляют макромасштабных закономерностей. Компромиссным представляется подход, при котором результаты глобальных климатических моделей достаточного пространственного разрешения используются (наряду с данными сети метеорологических, аэрологических и дистанционных наблюдений) в качестве характеристик внешних климатообразующих факторов, а эмпирические и локальные (мезомасштабные) математические модели — для климатоэкологической оценки региональных последствий глобальных процессов, в особенности в пограничном слое атмосферы как среде обитания человека.

### Моделирование климата и его изменений

Сравнение свыше 30 моделей общей циркуляции атмосферы, проведенное в рамках международного проекта АМІР II, показало, что наиболее совершенные из них на настоящий момент способны воспроизводить основные черты наблюдаемой атмосферной циркуляции с хорошей точностью. При этом модели интегрировались на 17 лет, а в качестве граничных условий использовался наблюдав-

шийся в течение 1979–1995 гг. временной ход температуры поверхности океана и границ морского льда. Ошибка воспроизведения такими моделями многих климатических величин уже незначительна, с которой эта величина известна из наблюдений. Вместе с тем существуют и систематические ошибки в воспроизведении климата, присущие практически всем моделям. Наиболее полный анализ воспроизведения климата различными моделями, участвующими в АМІР II, можно найти в Интернете по адресу: ([www-pcmdi.llnl.gov/amip](http://www-pcmdi.llnl.gov/amip)).

В качестве иллюстрации на рис. 5 приведено региональное (в пределах от 55° до 155° в.д. и от 50° до 90° с.ш.) поле систематических ошибок воспроизведения температуры воздуха на уровне 2 м с помощью модели общей циркуляции атмосферы [7, 23], разработанной в Институте вычислительной математики РАН (использованы разрешение 5° по долготе, 4° по широте и 21 уровень по вертикали). Здесь под систематической ошибкой понимается усредненная за весь период интегрирования (17 лет) разность между результатами расчетов и данными реанализа NCEP [24]. Как видно из рис. 5, распределение систематических ошибок по территории Сибири имеет ярко выраженный «очаговый» характер.

Современная тенденция развития климатических моделей базируется на использовании совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана и состоит во все более детальном учете всех физических механизмов, влияющих на климат. В настоящее время существует несколько десятков таких моделей, из которых более 20 участвуют в международном проекте CMIP (<http://www-pcmdi.llnl.gov/cmip>) по их сравнению [25], в том числе и климатическая модель ИВМ РАН [7]. Разрешение

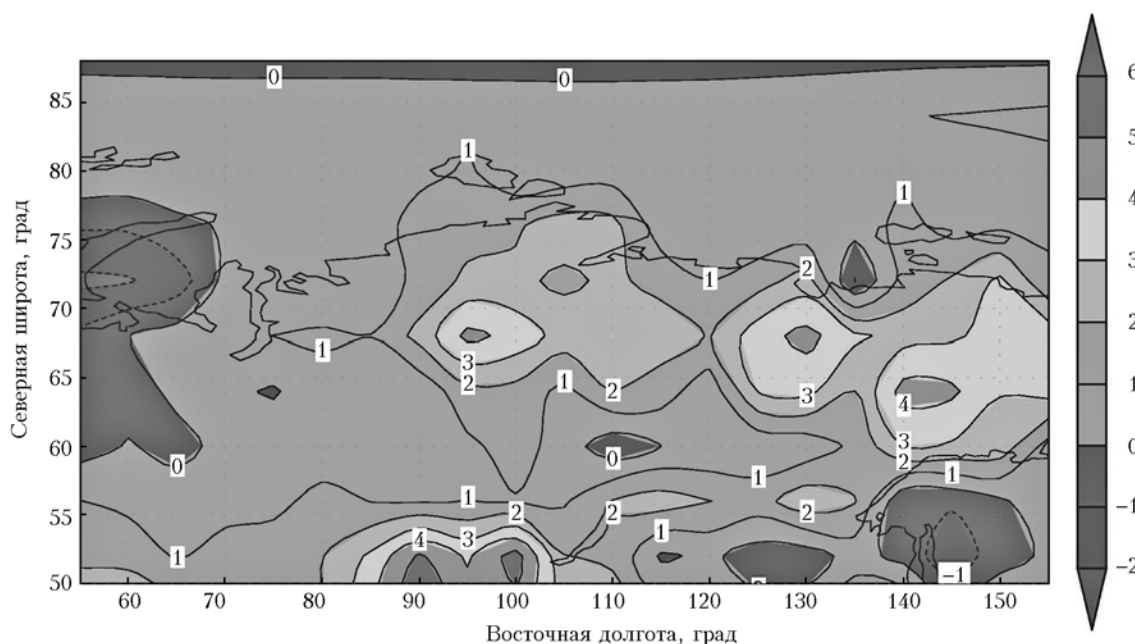


Рис. 5. Поле систематических ошибок регионального воспроизведения температуры воздуха на уровне 2 м (в К) с помощью модели общей циркуляции атмосферы

в атмосферном блоке этой модели составляет  $5^\circ$  по долготе,  $4^\circ$  по широте и 21 уровень по вертикали, а в блоке океана использовано разрешение  $2,5^\circ \times 2^\circ$  (по долготе и широте) с 33 уровнями по глубине. Температура поверхности океана при этом не задается, а рассчитывается (так же, как и для суши) с помощью уравнения теплового баланса. Следуя современным тенденциям развития совместных моделей, при стыковке атмосферной и океанической частей коррекция потоков на поверхности океана не используется.

С совместной моделью в ИВМ РАН проведен [26] длительный (интегрирование на 130 лет) численный эксперимент по моделированию современного климата. Концентрация всех радиационно активных газов была фиксирована и равна наблюдавшейся в конце XX в. В течение 50 лет происходило установление модельного климата, а для анализа были использованы результаты последующих 80 лет расчета. На рис. 6 приведено аналогичное рис. 5 распределение систематических ошибок совместной климатической модели (осреднение проводилось за последние 80 лет расчета). Сравнение рис. 5 и 6 показывает, что в целом картина распределения систематических ошибок одна и та же, однако в эксперименте с совместной моделью появился дополнительный источник ошибок в Арктическом регионе.

По условиям программы СМIP наряду с контрольным экспериментом по воспроизведению современного климата моделировалось также глобальное потепление, для чего задавалось увеличение атмосферной концентрации углекислого газа на 1% в год от современного значения в начале эксперимента [27]. Это примерно в 2 раза больше, чем наблюдаемая скорость увеличения содержания  $\text{CO}_2$ . Продолжительность этого численного экспе-

римента составляла 80 лет, а удвоение концентрации  $\text{CO}_2$  происходит примерно к 70-му году интегрирования модели. Под откликом модели на увеличение концентрации углекислого газа подразумевается разность данных эксперимента с увеличением  $\text{CO}_2$  и результатов расчетов в контрольном эксперименте за последние двадцать лет модельного времени (1961–1980 гг.). Как показали результаты расчетов, региональные (для территории Сибири) распределения отклика в приземной температуре и осадках на удвоение содержания углекислого газа имеют также «очаговый» характер (ср., в частности, с данными рис. 1), наиболее ярко выраженный для поля осадков.

### Оценка региональных последствий глобального потепления

Поскольку ожидается, что в условиях возрастающей концентрации парниковых газов наиболее значимые изменения произойдут в полях температуры и осадков, то актуальной задачей является оценка (на основе мониторинга и моделирования) последующих воздействий этого процесса на состояние вечной мерзлоты, которая покрывает большую часть территории России. Пороговое значение температуры  $0^\circ\text{C}$ , связанное с фазовыми переходами вода  $\rightarrow$  лед  $\rightarrow$  вода, является критическим для северных регионов, поскольку в условиях существенного потепления климата следует ожидать резкого ускорения уже наблюдающегося в настоящее время процесса деградации вечной мерзлоты. Это, в свою очередь, может послужить «спусковым» механизмом для эрозии и оседания почв с неблагоприятными последствиями как для экологической системы, так и для хозяйственной деятельности человека в этих районах.

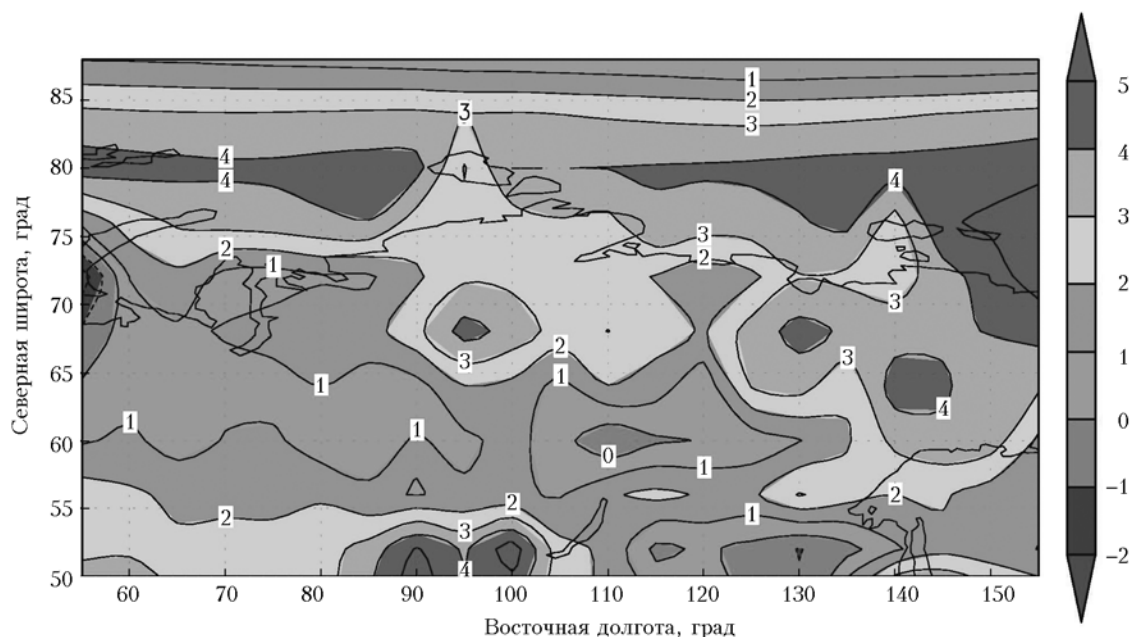


Рис. 6. Поле систематических ошибок регионального воспроизведения температуры воздуха на уровне 2 м (в К) с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана



Существенным является также и то, что в ходе этого процесса происходит высвобождение накопленных в толще вечной мерзлоты таких наиболее активных парниковых газов, как углекислый газ и метан, что, в свою очередь, способно воздействовать (наряду с другими факторами) на атмосферную циркуляцию. С другой стороны, увеличивается опасность неблагоприятных воздействий потепления на водные объекты (в частности, высушивание мелких водоемов и болот) и на лесные массивы (возрастание частот пожаров).

Среди особенностей грунтов вечной мерзлоты можно выделить наличие так называемого активного слоя, в котором происходят процессы промерзания и таяния вследствие сезонных колебаний составляющих теплового баланса на поверхности раздела «атмосфера–почва». Динамика активного слоя зависит от потока тепла, поступающего с поверхности почвы, ее структуры и термических свойств, количества жидкой влаги, наличия растительного покрова, теплового режима более глубоких слоев мерзлоты и др. Поскольку межгодовые колебания температуры могут распространяться в глубь мерзлой почвы на несколько десятков метров, а систематические (географически распределенные) многолетние измерения температуры на таких глубинах отсутствуют, то метод математического моделирования оказывается основным инструментом решения задач оценки степени уязвимости грунтов районов вечной мерзлоты по отношению к изменениям климата. В качестве «входных» параметров при этом используются либо архивные данные сети метеорологических станций [28], либо результаты расчетов с помощью глобальных климатических моделей [29–31].

Известно, что большая площадь, занятая тундрой и лесотундрой, на поверхности почвы покрыта мхами и лишайниками, которые имеют очень низкую теплопроводность и служат теплоизолятором в процессах массоэнергообмена между атмосферой и почвой. Такую же роль в некоторых областях, занятых тайгой, играют торфяники (например, в Западной Сибири). Толщина мхов может достигать 10 см и более, толщина торфа может быть больше 0,5 м.

В работе [28] с помощью одномерной модели процессов тепло- и влагопереноса в почве и снеге было проанализировано влияние толщины подобного теплоизолирующего слоя на процесс сезонного оттаивания почвы в условиях многолетней мерзлоты. Эта толщина оказалась важным параметром, влияющим на глубину оттаивания мерзлой почвы летом. В некоторых случаях, когда мерзлота имеет близкую к нулю температуру, значение этого параметра оказывается решающим для самого существования многолетней мерзлоты.

Важным элементом природной среды высоких и средних широт является снежный покров. Происходящие здесь физические процессы (уплотнение снега под действием метаморфизма и силы тяжести, фазовые переходы и др.) существенно влияют на термический режим активного слоя вечной мерзлоты. В качестве иллюстрации на рис. 7 дано сравне-

ние результатов измерений в 1971–1973 гг. [32] температуры почвы на различных горизонтах для ст. Якутск и результатов расчетов [28] с учетом уплотнения снега и без него.

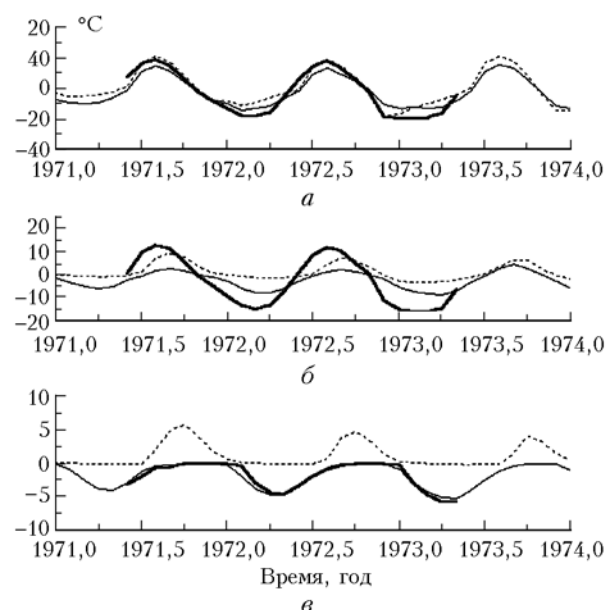


Рис. 7. Сравнение измеренной температуры (°C) активного слоя вечной мерзлоты в Якутске (сплошная жирная линия) с результатами модельных расчетов с учетом уплотнения снега (тонкая сплошная линия) и без него (пунктир) на горизонтах: *a* – 10 см, *б* – 50 см и *в* – 2 м

Важно отметить, что интегрирование упомянутой выше модели проводилось с использованием наблюдаемых атмосферных данных, покрывающих временной период 1937–1984 гг. Поэтому тот факт, что результаты моделирования с учетом уплотнения снега на рассматриваемом интервале 1971–1973 гг. неплохо согласуются с данными измерений, может служить хорошим подтверждением адекватности этой модели рассматриваемой физической системе. В целом же сравнение в [28] результатов расчетов с доступными данными наблюдений показало достаточно хорошее их согласие, что позволяет рассматривать эту модель как один из «инструментов» решения разнообразных задач, возникающих при исследовании проблем природной среды. В частности, важной задачей является совместный анализ данных мониторинга текущего состояния криолитосферы на территории России (Северный Урал, Сибирь, Дальний Восток), в том числе и в условиях антропогенных нагрузок [33], и результатов прогноза ее будущей эволюции. Такого рода исследования полезны как для дальнейшего совершенствования математических моделей, так и для рационального планирования наблюдательных программ.

### Учет региональных гидрологических процессов

В связи с прогрессом, достигнутым к настоящему времени в конструировании вычислительной техники и разработке систем параллельного

программирования, современный этап развития математических моделей климатической системы характеризуется постоянным совершенствованием пространственного разрешения и отказом (пока на региональном уровне) от гидростатического приближения. Указанные тенденции порождают новые проблемы в детализации описания физических процессов подсеточных масштабов, среди которых важное место занимает взаимодействие атмосферы с различными типами подстилающей поверхности на суше.

Одним из ключевых вопросов здесь является описание процессов взаимодействия атмосферы с сетью гидрологических объектов, важнейшую часть которой составляют озера и болота. Это особенно важно для северных территорий Евразии (Западно-Сибирская низменность, Карелия, Финляндия) и Северной Америки (большая часть территории Канады), где данная сеть представлена наиболее плотно и где, как показывают эксперименты с климатическими моделями, региональные температурные изменения в связи с глобальным потеплением проявляются наиболее ярко.

Для адекватной параметризации процессов взаимодействия атмосферы и суши в этих условиях необходимо, чтобы соответствующий блок климатической модели учитывал эффекты «гидрологической неоднородности» подстилающей поверхности. Особое значение при этом приобретают исследования, направленные на сравнение различных подходов к решению этой задачи на основе использования рядов длительных климато-экологических наблюдений в отдельных регионах. Примером такого комплексного исследования является осуществляемый в СО РАН интеграционный проект по изучению Большого Васюганского болота.

До настоящего времени представление болот в климатических моделях осуществляется как соответствующая спецификация того или иного участка подстилающей поверхности без учета происходящих в их толще термодинамических процессов, роль которых в процессах обмена энергией и массой между атмосферой и суши все еще недостаточно изучена. Вместе с тем к настоящему времени накоплен большой опыт по решению задач, связанных с отдельными аспектами взаимодействия атмосферы и болот (см., например, работы по гидравлике болот [34] и по исследованию процессов генерации и переноса метана [35]). Озера также существенно воздействуют на структуру приземного слоя атмосферы и тем самым на потоки тепла, водяного пара и импульса.

В большинстве моделей прогноза погоды и в климатических моделях эффекты, связанные со сравнительно небольшими и мелкими озерами, либо совсем не учитываются, либо параметризуются очень грубо, например в предположении, что водоем хорошо перемешан по глубине. Это фактически означает, что озеро рассматривается как элемент подстилающей поверхности. В реальности же озера в умеренных и высоких широтах большую часть года вертикально стратифицированы по плотности. Вместе с тем описание эффектов вертикальной

стратификации на основе современных теорий турбулентного переноса и в трехмерном приближении все еще требует значительных вычислительных затрат. Это наиболее существенное ограничение, если принять также во внимание необходимость рассмотрения на больших временных масштабах процессов тепловлагопереноса в расположенном под водоемом слое грунта.

В работе [36] представлен компромиссный подход к разработке параметризации эффектов болотно-озерных объектов, сочетающий достаточную полноту физического описания процессов тепловлагопереноса в системе «водоем—грунт» и вычислительную эффективность соответствующих алгоритмов реализации. С этой целью разработана одномерная модель термогидродинамики водоема, взаимодействующего с приземным слоем атмосферы и грунтом. В ней рассматриваются процессы диффузии и переноса течениями тепла и влаги, перенос влаги под действием силы тяжести, ее фазовые переходы, процессы эволюции ледяного и снежного покрова, тепловлагообмен с атмосферой. Таким образом, в первом приближении в модели учтены все основные процессы, формирующие коротко- (внутрисуточную) и долгопериодную (сезонную и межгодовую) изменчивость состояния системы «водоем—грунт». В качестве атмосферного воздействия были использованы данные регулярных многолетних метеорологических наблюдений за период с 1936 по 1984 г. в Сибири и Якутии.

Анализ результатов численных экспериментов с натурными данными [37] для оз. Сырдах в Центральной Якутии показал, что модель адекватно воспроизводит следующие основные параметры его климатического режима: среднюю глубину зимнего промерзания, время начала и окончания ледостава, среднее испарение в теплый период, эволюцию температурного профиля. Кроме того, в численном эксперименте воспроизведено талик под рассматриваемым озером, существование которого также подтверждается данными наблюдений.

Таким образом, имеется определенный задел для решения фундаментальной задачи исследования физических процессов и механизмов, определяющих взаимодействие атмосферы (в частности, ее пограничного слоя) с гидрологически неоднородной поверхностью суши в условиях наблюдающихся и будущих климатических изменений.

Необходимо разработать трехмерную негидростатическую математическую модель динамики пограничного слоя, сопряженную с моделью тепловлагопереноса в почве (покрытой растительностью и/или снегом) и в озерно-болотных системах. Используя результаты численного моделирования и климато-экологического мониторинга, целесообразно построить и опробовать усовершенствованную схему параметризации процессов взаимодействия атмосферы и суши в гидродинамических моделях климата.

## Заключение

Приведенные выше результаты анализа эмпирических данных свидетельствуют о коренных при-

родно-климатических изменениях в Сибири за последние десятилетия. Результаты математического моделирования показывают, что возможной причиной таких изменений могут быть наблюдающиеся в настоящее время процессы глобального потепления. Предпринимаемая попытка сблизить два пока существенно различающихся методологических подхода (эмпирическое и математическое моделирование) для исследований такой динамичной природно-климатической системы, как Сибирь, представляется своевременной и перспективной. Такая попытка является необходимым направлением дальнейших фундаментальных исследований и полностью вписывается в упомянутую во введении концепцию «интегрированных региональных исследований». Вместе с тем проведенное выше сопоставление двух подходов к изучению природно-климатических изменений выявляет и ряд нерешенных проблем, в том числе и методологических.

Одна из таких методологических проблем связана с необходимостью стыковки исходных понятий и терминов. Так, анализируемые выше эмпирические параметры (среднегодовые и среднемесячные температуры, амплитуды межсезонных колебаний, многолетние периодичности и т.д.) являются достаточно показательными для иллюстрации наблюдаемых климатических изменений в отдельных регионах, но пока не согласуются с употребляемыми параметрами для описания климатической изменчивости при математическом моделировании. Более того, многие из эмпирических параметров, как и часто употребляемое понятие «региональная климатическая система», пока оказываются за рамками математически строгих определений климата и климатических систем.

Другая общая проблема для обоих подходов связана с необходимостью разработки эффективных технологий по количественной оценке долевого влияния различных факторов на наблюдаемые климатические изменения. Для решения этой проблемы при обработке инструментальных данных необходим поиск достаточной совокупности измеряемых параметров и технических средств для комплексного мониторинга [6], а при математическом моделировании необходимо дальнейшее развитие теории чувствительности климатической системы к малым внешним воздействиям [38]. В обоих случаях актуальность проблемы определяется не только задачами интерпретации и прогнозирования современных природно-климатических изменений, но и продолжающейся дискуссией по научной обоснованности и эффективности Киотского протокола.

Отмеченные и ряд других проблем интегрированных региональных исследований не относятся к числу нерешаемых. Но от успешного решения именно этих проблем зависит разработка новой парадигмы для описания причинно-следственных связей при глобальных и региональных изменениях окружающей среды и климата.

1. *Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии: Сборник, посвященный 85-летию ака-*

демка М.И. Будыко (1920–2001). СПб.: Наука, 2005. 247 с.

2. *Коптюг В.А.* Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, июнь 1992 года): Информационный обзор. Новосибирск: СО РАН, 1992. 62 с.
3. *Заварзин Г.А., Котляков В.М.* Стратегия изучения Земли в свете глобальных изменений // Вест. РАН. 1998. Т. 68. № 1. С. 23–29.
4. *Кондратьев К.Я., Лосев К.С.* Иллюзии и реальность стратегии устойчивого развития // Вест. РАН. 2002. Т. 72. № 7. С. 592–601.
5. *The International Geosphere-Biosphere Programm 2. Annual Report. 2002.* www.igbp.kva.se
6. *Региональный мониторинг атмосферы.* Ч. 1–5 / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-е СО РАН, 1997–2001 гг.
7. *Дымников В.П., Лысков В.Н., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грищун А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., Чавро А.И.* Моделирование климата и его изменений // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. М.: Наука, 2005. Т. 2. С. 37–173.
8. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л., 1939. 207 с.
9. *WMO: World Meteorological Organisation. The Physical Basis of Climate and Climate Modelling.* GARP Publications, 1975, Series № 16, WMO, Geneva. (Физические основы теории климата и его моделирования / Перевод под ред. А.С. Монина. Л.: Гидрометеоиздат, 1977).
10. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Комаров А.И., Кусков А.И.* Современные природно-климатические изменения в Сибири: ход среднегодовых температур и давления // Геогр. и природ. ресурсы. 2004. № 3. С. 90–96.
11. *Климатический атлас СССР.* Т. 1. М., 1960. 181 с.
12. *Кабанов М.В.* Итоги и задачи мониторинга современных природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 110–115.
13. *География России: Энциклопедический словарь.* М.: Изд-во БРЭ, 1998. 800 с.
14. *Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири.* Новосибирск: Изд-во ИАЭ СО РАН, 2000. 471 с.
15. *Дюкарев Е.А., Кабанов М.В., Шишлов В.И.* Системно-эволюционный анализ региональных климатических изменений // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 29–35.
16. *Шишлов В.И., Дюкарев Е.А.* Анализ и интерпретация климатических изменений // Вычисл. технол. 2004. Т. 9. Спецвыпуск. С. 58–70.
17. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
18. *Torrence C., Compo G.P.* Practical Guide to Wavelet Analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. N 1. P. 61–78.
19. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В.* Вейвлет-преобразование при анализе природно-климатических изменений // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 21–28.
20. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В.* Некоторые закономерности современных природно-климатических изменений в Сибири // Матер. 3-й науч. школы «Болота и биосфера». Томск: ЦНТИ, 2002. С. 74–90.
21. *Семенов С.М., Гельвер Е.С.* Климатические измерения годовой суммы осадков и частоты измеренных

- осадков на территории России и соседних стран в XX веке // Докл. РАН. 2003. Т. 393. № 6. С. 818–821.
22. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Решетько М.В., Таранюк М.И. Анализ структуры временных рядов повторяемости форм атмосферной циркуляции и грозовой активности // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 8. С. 693–698.
  23. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лыкосов В.Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. Описание модели A5421 версии 1997 года и результатов эксперимента по программе AMIP II. Деп. ВИНТИ. 03.07.98. № 2086–В98. 215 с.
  24. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. N 1. P. 437–471.
  25. Meehl G.A., Boer G.J., Covey C., Latif M., Stouffer R.J. The coupled model intercomparison project (CMIP) // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2000. V. 81. N 2. P. 313–318.
  26. Дианский Н.А., Володин Е.М. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2002. Т. 38. С. 824–840.
  27. Володин Е.М., Дианский Н.А. Отклик совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана на увеличение содержания углекислого газа // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. С. 193–210.
  28. Мачульская Е.Е., Лыкосов В.Н. Моделирование термодинамической реакции вечной мерзлоты на сезонные и межгодовые вариации атмосферных параметров // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2002. Т. 38. N 1. С. 20–33.
  29. Anisimov O.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models // Global Planet. Change. 1997. V. 15. N 1. P. 61–77.
  30. Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Симонов В.В., Шкляревич О.Б. Мдельные расчеты мощности толщи многолетнемерзлых пород и распределения глубин сезонного протаивания суглинков при современном климате на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2000. № 4. С. 36–44.
  31. Демченко П.Ф., Величко А.А., Елисеев А.В., Мохов И.И., Нечаев В.П. Зависимость условий распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеорекоконструкций // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2002. Т. 38. С. 165–174.
  32. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 285 с.
  33. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорол. и гидрол. 2002. № 1. С. 22–34.
  34. Кашеваров А.А. Математическое моделирование взаимодействующих течений подземных и поверхностных вод на заболоченных территориях // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. С. 83–87.
  35. Крылова А.И., Крупчатников В.Н. Глобальное моделирование потоков метана от болотных экосистем // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. С. 98–103.
  36. Степаненко В.М., Лыкосов В.Н. Численное моделирование процессов тепло-влажнопереноса в системе «водоем–грунт» // Метеорол. и гидрол. 2005. № 3. С. 95–104.
  37. Павлов А.В., Тишин М.И. Тепловой баланс крупного озера и прилегающей территории в Центральной Якутии // Строение и тепловой режим мерзлых пород. Новосибирск: Наука, 1981. С. 53–83.
  38. Дымников В.П., Филатов А.Н. Основы математической теории климата. М.: ВИНТИ, 1994. 252 с.

**M.V. Kabanov, V.N. Lykosov. Monitoring and modeling of nature-climate variations in Siberia.**

A review of empirical regularities recently revealed based on statistical processing of collected instrumented data is presented. Among these regularities are: trends and trajectories of the warming observed in Siberia, interseasonal variations of surface temperature, time periodicities of the warming in Siberian cities. The possibility of application of modern mathematical climate models for describing regional natural and climate changes are also under discussion. Encouraging results of mathematical modeling are the following: retrieval of regional surface temperature using joint model of general atmospheric and ocean circulation, assessment of regional consequences of global warming, accounting for regional hydrological processes. Combination of these two methodological approaches (empirical one and mathematical modeling) is noted to be prospective overcoming some unsolved problems arising at such a combination is shown to be necessary.