

М.В. Кабанов¹, В.Н. Лыкосов²

Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири

¹ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск*

² *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 км²) 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 (СО₂, СН₄ 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 °C 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),

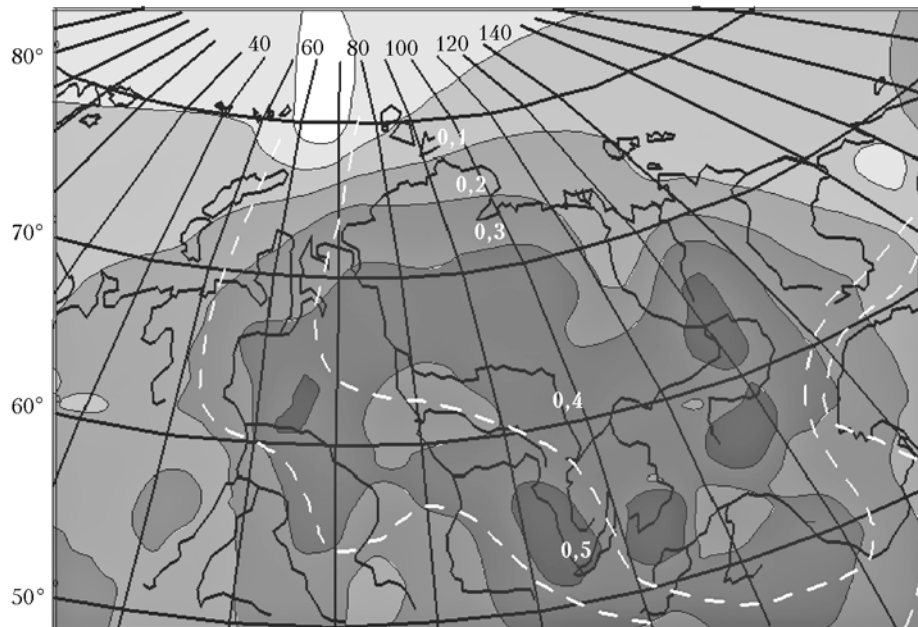


Рис. 1. Карта линейных трендов среднегодовой приземной температуры за период 1965–2000 гг. Штриховые кривые — изолинии среднемесячной температуры в январе за период 1881–1935 (верхняя для $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$, нижняя для $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

а в отдельных районах достигли величины линейного тренда $0,5$ град/10 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.

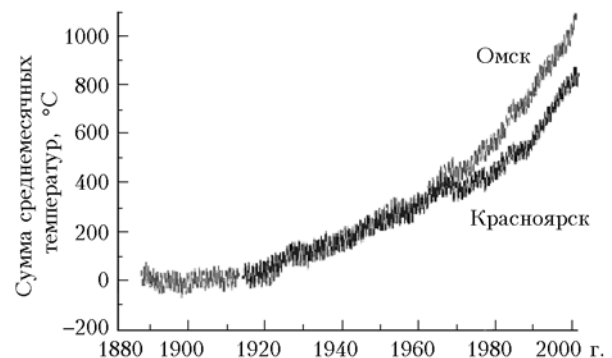


Рис. 2. Эволюционные траектории приземной температуры

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 км^2 , объем 73 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