

PHYSICAL ASPECTS  
OF MODELLING THE  
CHANGES IN THE EARTH  
CLIMATIC SYSTEMS

Yu. A. KRAVTSOV

*In what way the Earth climate change may be predicted? What factors are the most important for prediction? What may prevent accurate prediction of the climate changes? All this is a subject of this paper.*

**Как предсказывают изменения климата Земли? Какие факторы оказывают наибольшее влияние на этот процесс? Что мешает точному предсказанию климатических изменений? Вот вопросы, которые обсуждаются в статье.**

## ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЗЕМЛИ

Ю. А. КРАВЦОВ

Московский педагогический государственный университет

### ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В ЗЕМНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Климат Земли формируется в результате сложного взаимодействия природных сред: гидросферы (океан и внутренние водоемы), атмосферы, криосферы (ледники и морские льды), литосферы (суши) и биосферы. Природные среды получают энергию от Солнца в виде оптического излучения. Энергия оптических квантов превращается затем в механическую энергию движущихся масс, в потоки явной и скрытой теплоты, в химическую, электрическую и другие формы энергии. “Излишки” энергии отдаются Землей в космическое пространство в форме длинноволнового (инфракрасного) электромагнитного излучения.

Хотя потоки энергии приходящего и уходящего излучений достаточно точно сбалансированы, природные среды отнюдь не стремятся к состоянию статистического равновесия. Более того, процессы самоорганизации в земной климатической системе уводят ее все дальше и дальше от равновесия. В этом заключается специфика открытых систем, к которым принадлежит и Земля: процессы самоорганизации в таких системах приводят к образованию новых структур, тогда как стремление к равновесию предполагает разрушение структур.

Новые структуры в сложных самоорганизующихся системах образуются в результате действия многочисленных обратных связей, как отрицательных (они гасят постоянно возникающие возмущения), так и положительных. Последние приводят к росту возмущений, которые затем могут перерасти в новые структуры. В сущности самоорганизация земной климатической системы – это непрерывный процесс эволюции.

Краткое описание основных обратных связей в земной климатической системе было дано в нашей предыдущей статье [1]. В данной статье мы остановимся на проблемах математического моделирования климатических процессов, точнее, на физических аспектах такого моделирования. Задача состоит в том, чтобы объяснить трудности, с которыми приходится встречаться исследователям.

## УСРЕДНЕННЫЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ СРЕД

В задачах климатологии уравнения движения необходимы для прогноза ожидаемых изменений. Уравнения гидродинамики, при помощи которых описывают движение воздушных и водных масс, для описания климатических изменений неприменимы. Причиной служит присущее им свойство локальной неустойчивости. Это свойство проявляется в том, что малые возмущения той или иной природы (неточность начальных условий, внутренние и внешние шумовые воздействия и т.д.) достаточно быстро нарастают во времени и/или в пространстве и в конце концов делают долгосрочный прогноз несостоятельным. Соответствующее время прогнозируемого поведения, которое называют иногда горизонтом предсказуемости, оказывается достаточно коротким, в условиях земной атмосферы обычно не более 7–10 дней. Иными словами, гидродинамические уравнения могут обеспечить только сравнительно краткосрочный прогноз погоды, но никак не могут претендовать на прогнозирование климатических изменений.

Альтернативный подход обеспечивают уравнения балансного типа, то есть уравнения, которые фиксируют баланс какой-либо величины  $G$  (масса, энергия, тепло) в выделенной части пространства. Особенность балансных уравнений состоит в том, что они оперируют не с мгновенными и локальными значениями, а с усредненными значениями. При описании климатических изменений усреднение должно распространяться на промежутки времени не менее одного года и на значительные пространственные области, размеры которых не должны быть меньше 3–5° по широте и долготе.

Предельным случаем усреднения является так называемая нуль-мерная, то есть точечная, модель Земли, которая описывает климат при помощи единой для всего земного шара температуры  $T$ . Эту температуру можно найти, приравняв падающий на земной диск поток коротковолнового (оптического) излучения потоку длинноволнового (инфракрасного) излучения, покидающего поверхность Земли. В соответствии с законом Стефана–Больцмана поток уходящего излучения пропорционален четвертой степени температуры. Такой усредненный подход дает разумные оценки средней по поверхности Земли температуры, но вовсе не описывает динамику климата.

Переход от статической нуль-мерной модели к протяженной модели климатической системы предполагает отказ от единой для всего земного шара температуры  $T$  в пользу непрерывного изменения усредненной температуры с широтой. Мы приходим тогда к стационарным моделям атмосферных движений, которые описывают воздушные потоки, выравнивающие температурный профиль вдоль меридиана-

нов. Стационарные модели атмосферных процессов сыграли значительную роль в понимании механизмов самоорганизации в климатических системах.

Модели, претендующие на описание переменного климата, должны включать в рассмотрение более инерционные, чем атмосфера, звенья климато-экологической системы, а именно: океан и арктические льды. Кроме того, по техническим причинам и по существу проблемы приходится разбивать поверхность земного шара на конечное число элементов либо по формальному признаку, скажем несколько широтных зон, либо с привязкой к особенностям строения материков и океанов.

Независимо от того, как именно разбивается поверхность земного шара на элементы, динамические уравнения строятся по стандартной балансной схеме: скорость изменения какой-либо величины  $G_i$  в выделенной области  $V_i$  определяется скоростью обмена  $g_{ik}$  (теплом, влагой, солью и т.д.)  $i$ -го элемента с соседними элементами  $k$  и скоростью  $g_i$  поступления (убыли) величины  $G_i$  от внешних источников.

**Скорость изменения величины  $G_i$  в области  $V_i$  = сумма потоков  $g_{ik}$  со стороны соседних элементов + производство (убыль)  $g_i$  в элементе  $V_i$ .**

Такое уравнение баланса можно записать в компактной аналитической форме:

$$\frac{dG_i}{dt} = \sum_{j=1}^n g_{ij} + g_i. \quad (1)$$

Штрих у знака суммы означает, что суммирование распространяется на соседние элементы, то есть элементы с номерами  $k$ , отличными от  $i$ .

Обычно предпочитают переменные, согласованные с географическими особенностями океанов, атмосферы и ледовых массивов. Этому способствует, в частности, аппроксимация океанов и материков простыми геометрическими фигурами вплоть до банальных прямоугольников в случае материков и параллелепипедов в случае океанов. Такая аппроксимация обычно сопровождается выбором крайне ограниченного числа физических характеристик океана, атмосферы и материкового льда, как-то: циркуляционные потоки тепла и массы, обмен соленой и пресной водой, масса материкового и морского льда. Даже при весьма экономном введении переменных их число обычно переваливает за 10–15. Возможно, это не так много для современных ЭВМ. Однако пределы числу переменных устанавливаются не производительностью ЭВМ, а тем, насколько адекватна принятая модель физической реальности. Иными словами, на нынешнем этапе стремление к как можно более точному описанию климатических изменений подразумевает не столько увеличение размерности модели, сколько рациональный выбор некоторого минимального числа

физических выделенных переменных и введение в модель реалистичных параметров, природных процессов, в частности коэффициентов, характеризующих скорости процессов тепло-, массо- и лучистого обмена.

К сожалению, современные средства наблюдения за климатическими процессами не всегда в состоянии снабдить нас достаточно точными данными о процессах переноса. Между тем климатическая система столь тонко сбалансирована, что даже малые отклонения от баланса могут привести к ощутимым последствиям. Напомним, в частности, что при общем потоке солнечной энергии  $1400 \text{ Вт/м}^2$  мощность парникового эффекта, обусловленного углекислым газом, составляет всего лишь  $6 \text{ Вт/м}^2$ . Удвоение содержания углекислоты в атмосфере грозит повысить тепловыделение вдвое, то есть до  $12 \text{ Вт/м}^2$ . Однако даже столь малое приращение может существенно повлиять на окружающую природную среду. Этот пример дает представление о точности, с которой должны быть измерены параметры природных процессов.

При математическом моделировании климатических процессов наиболее неприятны ситуации, когда какой-то существенный, но скрытый от наблюдателя механизм переноса вообще не включается в климатическую модель, разумеется, по неведению, а не по злему умыслу. В этом случае высокая точность измерения параметров модели еще не гарантирует высокого качества модели в целом. Такие усеченные модели, не учитывающие скрытые процессы, имеют, очевидно, ограниченную предсказательную силу.

## ОТ МОДЕЛИ К МОДЕЛИ

Результативность усредненных методов описания климатических изменений можно проиллюстрировать множеством предложенных моделей, которые отличаются друг от друга выбором объекта моделирования (та или иная подсистема), идеализацией геометрической формы океанов и материков, количеством элементарных ячеек, набором учитываемых и неучитываемых физических факторов, аппроксимацией нелинейных зависимостей в усредненных уравнениях, выбором численных параметров. Совершенствование модели сопровождается накоплением и обновлением данных, ревизией исходных положений, включением в анализ новых физических механизмов. Эти тенденции в эволюции моделей мы проиллюстрируем на проблеме циркуляции глубинных вод в Мировом океане, которая до сих пор не имеет адекватного описания.

Основной движущей силой обращения глубинных вод в океане являются термохалинные процессы, то есть процессы солевого (халинного) обмена, возникающие под действием температурных изменений. Соленая и теплая вода удерживается на по-

верхности океана силами плавучести (архимедова сила). Поверхностные слои воды, перемещающиеся от экватора в сторону полюсов, имеют избыток солености. Охлаждаясь в период зимних холодов, такая вода увеличивает свою плотность несмотря даже на поступление пресной воды от осадков и частично от таяния ледников. В результате соленые воды погружаются на большие глубины. Процесс образования глубинных вод происходит как в северной части Атлантики, так и у берегов Антарктики. Какова дальнейшая судьба этих глубинных вод? Этот вопрос породил обширную литературу и множество моделей обращения глубинных вод. Для того чтобы представить многообразие точек зрения, рассмотрим две работы [2, 3], которые исходят из различных физических моделей.

Работа Е. Бирчфельда, Х. Ванга и Дж. Рича [2] посвящена осцилляциям в системе океан–атмосфера–континентальные льды. Эта работа опирается на традиционные представления о механизме погружения плотных вод, учитывая процессы переноса массы, тепла и соли в меридиональном направлении. Дополнительно к этому в [2] приняты во внимание переносимые атмосферой потоки влаги из Атлантического океана в Тихий и обратно. Эти потоки пресной воды оказывают регуляризирующее действие на соленость вод океана.

Атлантический, Тихий и Индийский океаны моделируются параллелепипедами различной протяженности и примерно одинаковой глубины (около 4000 м). Все океаны сообщаются в южной части. В океанах выделяются двухслойные субтропические и однослойные высокоширотные ячейки. Таким образом, система содержит девять океанических и три атмосферные ячейки, но число переменных на самом деле больше, так как в систему уравнений включена еще соленость вод. В качестве основных переменных выбраны значения температуры  $T_i$  и солености  $S_i$  ячейки номера  $i$  объемом  $V_i$ . Эти переменные подчиняются балансным уравнениям типа (1).

Интерес к возможным осцилляциям в климате имеет давнюю историю. На возможность возникновения колебаний в системе океан–лед одним из первых обратил внимание К.Н. Федоров, который сразу же отметил важность термохалинных процессов. Сейчас считают, что термохалинная циркуляция, приводимая в движение североатлантическими глубинными водами, является глобальным явлением, распространяющимся на Индийский и Тихий океаны. Очевидно, такая циркуляция может оказать значительное влияние на изменения климата.

Осцилляции глобального масштаба оказываются возможными благодаря существованию разнообразных обратных связей в системе океан–атмосфера–континентальные льды. Например, когда в субтропиках испаряется значительное количество воды с поверхности океана, соленость оставшейся

океанической воды возрастает. Эта вода с повышенной соленостью переносится в приполярные области и порождает глубинные воды. Между тем влага, испарившаяся с поверхности океана в субтропиках, тоже в конце концов попадает в приполярные области в виде осадков. Выпавшие осадки опресняют океанические воды и тем самым замедляют производство глубинных вод.

В зависимости от того, какой из указанных процессов сильнее (перенос соленых вод или процесс их распреснения), возможно существование двух климатических режимов. Одному режиму соответствует усиленная термохалинная циркуляция, которая может направлять в Северную Атлантику теплые воды даже из южного полушария. Эта “теплая” вода, возможно, объясняет умеренно теплый климат в Европе в современную эпоху и межледниковые периоды. Другой — “прохладный” режим реализуется в условиях, когда избыток пресной воды в приполярных областях блокирует производство глубинных вод и “выключает” термохалинную циркуляцию. Исходя из этой картины была разработана концепция “солевых” осцилляций климата, связанных с “выключением” и “включением” Атлантической термохалинной циркуляции с периодом порядка 1000 лет.

Результаты работы [2] приближают нас к пониманию резких климатических изменений, которые произошли около 8–15 тыс. лет назад, когда заканчивался ледниковый период. Результаты работы [2] интересны еще в одном отношении. Они показывают, что динамические модели климата, примененные ретроспективно, довольно быстро теряют свою предсказательную силу. Во всяком случае палеоокеанографические данные, то есть данные, извлекаемые из осадочных пород, еще не допускают вполне однозначной интерпретации при удалении всего на 7–15 тыс. лет назад.

Модель обращения глубинных вод, предложенная в работе [3], обходится без континентальных льдов и без обмена влагой между Атлантическим и Тихим океаном, но вводит в игру новый физический фактор — сильные западные ветры, которые передают свой импульс океаническим течениям в районе пролива Дрейка, разделяющего Южную Америку и Антарктиду. Поверхностные напряжения, создаваемые этими ветрами, вызывают (с учетом сил Кориолиса) дополнительную циркуляцию вод в меридиональном направлении и тем самым облегчают подъем глубинных вод к поверхности в Южной Атлантике.

Предложенный в работе [3] механизм поднятия глубинных вод конструктивно разрешает проблему, которая долгое время ставила в тупик океанологов. Дело в том, что медленное поднятие вод в районах субтропиков, необходимое для замыкания потоков воды, “провалившихся” в глубину в Северной Ат-

лантике, не подтверждалось ни теоретическими аргументами, ни специально проведенными экспериментами. Замыкание циркуляции глубинных вод требует довольно значительных коэффициентов турбулентной диффузии, порядка  $1 \text{ см}^2/\text{с}$ , тогда как эксперименты указывают на величины около  $0,1 \text{ см}^2/\text{с}$ . Таким образом, предложенный в [3] механизм апвеллинга (подъема вод) в районе пролива Дрейка приводит к новой картине обращения глубинных вод: образовавшиеся в Северной Атлантике глубинные воды медленно, с периодом около 600 лет, мигрируют на юг и выходят на поверхность океана лишь у пролива Дрейка, в районе  $60^\circ$  южной широты.

Общий вывод из обсуждаемых статей состоит в том, что предстоит еще много работы, прежде чем можно будет говорить о понимании процессов обращения глубинных вод в океане. Факты, накопленные к настоящему времени, свидетельствуют о том, что система океан–атмосфера образует глобальную систему переноса вещества и энергии и что локальные изменения, скажем силы ветра или количества осадков, могут повлечь за собой глобальные последствия.

## ПРОБЛЕМА ГОМЕОСТАЗА ЗЕМНОЙ КЛИМАТО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

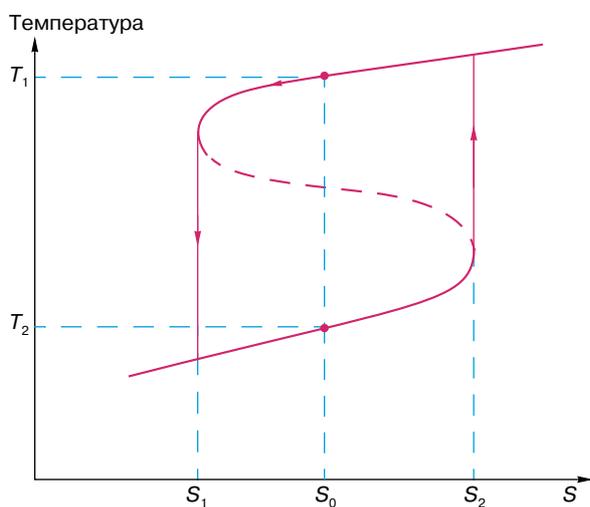
Выравнивание температуры на поверхности Земли за счет интенсификации циркуляционных процессов служит одним из примеров сильных нелинейных обратных связей в земной климатической системе. Каждая из этих нелинейных связей управляет только частью климатической системы, но в совокупности они способствуют достижению состояния, близкого к гомеостазу, когда система обратных связей стабилизирует температуру планеты, подобно тому как происходит регуляция температуры в живом организме. Это сходство позволяет даже говорить о “живой планете Земля”, тем более что биосфера играет важную, хотя и не вполне изученную роль в процессе терморегулирования. Любой гомеостатической системе присущи определенные границы авторегулирования. Выходы за пределы этих границ могут повлечь за собой существенную перестройку обратных связей и переход системы в иное состояние (явление бистабильности). Определение границ толерантности земной климатической системы к различным воздействиям является важнейшей задачей климатологии.

Наблюдение за природными процессами показывает, что способность климатической системы приспосабливаться к изменяющимся условиям оказывается даже несколько более высокой, чем можно было бы представить на основе уже существующих моделей климата.

Между тем перестройка климатической системы из-за неспособности обратных связей удержать ее в допустимых пределах может означать переход в

состояние, существенно отличающееся от современного. Представление о характере ожидаемых явлений дают расчеты изменения климата в результате массовых пожаров от взрывов ядерных бомб. В этом случае огромные массы тепла и аэрозолей могут заметно уменьшить поток солнечного тепла на Землю и вызвать сильное похолодание — “ядерную зиму”. По аналогии с “ядерной зимой” можно говорить о наступлении “климатической зимы”, если результирующая температура понизится, или о приходе “климатической жары” в случае повышения температуры.

Пусть, например, нынешнее состояние климата характеризуется средней температурой  $T$  и соответствует управляющему параметру  $S$  (рис. 1), под которым для определенности можно понимать, скажем, поток излучения от Солнца или загрязненность атмосферы и океана. Предположим, что система переходит в состояние “климатической зимы”, когда управляющий параметр  $S$  становится меньше первого критического значения  $S_1$  (см. рис. 1). В силу предполагаемого гистерезисного характера явления возвращение  $S$  к первоначальному значению  $S_0$  вовсе не обязательно вернет климат в прежнее состояние: конечная температура  $T_2$  может оказаться ниже начального значения  $T_1$  (в случае срыва в состояние “климатического лета” значения  $T_1$  и  $T_2$  меняются местами). Для возврата в первоначальное состояние нужно сначала увеличить  $S$  до следующего критиче-



**Рис. 1.** Гипотетическая гистерезисная зависимость глобальной температуры  $T$  от управляющего параметра  $S$ , в качестве которого могут выступать, например, поток солнечного излучения или уровень загрязнения окружающей среды. При переходе через критические значения  $S_1$  или  $S_2$  температура меняется скачком и не возвращается к первоначальному состоянию. Интервал  $|S_1 - S_2|$  характеризует запас прочности климатической системы к внешним возмущениям

ского значения  $S_2$ , которое превышает не только  $S_1$ , но и  $S_0$  (рис. 1), и только после этого снизить  $S$  до значения  $S_0$ . В итоге для возвращения к прежнему климатическому состоянию нужно совершить полный гистерезисный цикл с размахом  $|S_2 - S_1|$ . Практически это может означать если не полную, то хотя бы временную невозможность возвращения климата к исходному состоянию: человечество вряд ли окажется в состоянии само осуществить изменение параметра  $S$  с размахом  $|S_2 - S_1|$  и может рассчитывать лишь на медленную релаксацию к первоначальному состоянию за счет процессов самоорганизации с большими характерными временами. Такие медленные процессы не могут предотвратить внезапный срыв в иное климатическое состояние, но могут привести в действие малозаметные в обычных условиях факторы: дополнительные изменения объема и структуры криосферы (площадь и толщину полярных ледовых покровов, площадь сезонных снежных покровов на умеренных широтах), перестройку и адаптацию биосферы и др.

Кроме классических бифуркационных механизмов, связанных с изменением теплового баланса, о которых писал известный отечественный климатолог М.И. Будыко, к бистабильности могут привести смены режимов океанических течений благодаря термохалинным процессам, о чем говорилось выше. К бистабильности могут привести также таяние материковых льдов и расширение границ полярных морских льдов. Во всех случаях причина гистерезиса приписывается блокированию тех или иных механизмов энерго- и массообмена. Большинство исследователей считают, что вероятность скачкообразных изменений климата Земли в результате накапливающихся изменений сейчас невелика, но при выработке долгосрочной стратегии поведения человечества такую опасность не следует упускать из виду.

## МЕХАНИЗМЫ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ КРИТИЧНОСТИ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Термин “самоорганизующаяся критичность” употребляется для обозначения процессов типа сброса, срыва, обвала, обрушения. Такие процессы наступают после того, как управляющий параметр системы в результате ее самоорганизации достигнет критического значения. Процессы такого рода весьма распространены в природе. Наиболее известный пример — снежные лавины в горах. Лавины образуются, когда запас снега превышает некоторый предел, характерный для данного ландшафта и данного состояния снежного покрова. Второй пример — тропические ливни, которые сбрасывают излишки атмосферной влаги по достижении некоторого критического уровня влагосодержания. Третий пример — образование тайфунов в экваториальных районах Мирового океана. Посредством тайфунов океан и атмосфера как бы сбрасывают излишки тепловой энергии. Вероятность возникновения

тайфунов определяется температурой поверхности океана: они зарождаются там, где вода прогревается выше 27°C. Очевидно, потепление климата приведет к расширению хорошо прогретых акваторий и тем самым к повышению вероятности образования тайфунов.

Явления типа самоорганизующейся критичности играют важную роль в регулировании климатической системы. Особенность таких явлений состоит в том, что они практически не проявляют себя в докритических условиях, и поэтому их очень трудно предусмотреть в математических моделях климата. С некоторым риском преувеличения можно утверждать, что все теоретические модели климата неполны: с высокой степенью вероятности в них не заложены те или иные сбросовые механизмы, которые в полной мере заявляют о себе после перехода через критическое значение параметра (температура, скорость, влажность и т.д.).

Эволюция климатической системы сопровождается появлением и преодолением все новых и новых критичностей, которые едва предвидимы на этапе, предшествующем их возникновению, но могут иметь разрушительные последствия на этапе максимального развития. Некоторые из критичностей могут стимулироваться антропогенными процессами. По отношению к таким критичностям следует проявлять особую бдительность: они могут развиваться быстрее, чем будут осознаны и хотя бы частично ослаблены происходящие изменения.

В условиях, когда растет понимание важности механизмов самоорганизующейся критичности, выявление климатических трендов становится недостаточным для прогноза климата. Важно предвидеть появление критических явлений с тем, чтобы быть готовым к неожиданным их последствиям уже сейчас. Это вполне отвечает призыву видных экологов и политиков (следует прежде всего упомянуть вице-президента США А. Гора) крайне ответственно подходить к действиям, которые могут повлиять на земную климато-экологическую систему.

## **О ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ**

Проблема предсказуемости природных процессов чрезвычайно трудна для разрешения. Это обусловлено многими причинами. Во-первых, мы имеем дело с очень сложной эволюционирующей системой со множеством взаимосвязей и взаимовлияний. Роль некоторых процессов и взаимосвязей еще полностью не изучена, многие процессы еще не получили адекватного объяснения, а некоторые явления и взаимосвязи вообще скрыты от наблюдателей. Иными словами, мы присутствуем при становлении целостной модели климатических изменений, которая принимает во внимание все новые и

новые факты и в то же время сохраняет еще значительные неопределенности. Во-вторых, сложные природные самоорганизующиеся системы обычно демонстрируют поведение типа динамического хаоса и обладают свойством локальной неустойчивости. Это свойство предопределяет наличие горизонта предсказуемости, который с большим трудом поддается расширению. Этому мешают и неопределенность прогностических моделей, и наличие шумов различной природы, и острая недостаточность экспериментальных данных, и еще более острая недостаточность в финансировании.

Прогнозирование климата предполагает разработку моделей, основанных на совокупности теоретических и экспериментальных фактов. Недостаток любого модельного подхода заключается в том, что явления и процессы, заранее не заложенные в исходную прогностическую модель, не могут чудесным образом проявиться впоследствии при численном моделировании. Иными словами, модель редко бывает умнее своего создателя.

В последнее время большое внимание уделяется восстановлению динамической модели процесса непосредственно из зашумленных экспериментальных данных, с тем чтобы затем использовать восстановленные динамические уравнения для прогноза. В основе этого подхода лежат методы решения обратных задач нелинейной динамики, восходящие к трудам выдающегося отечественного математика А.Н. Колмогорова и Нобелевского лауреата Дж. Габора. Разработка методов реконструкции динамических уравнений системы по временным рядам ее состояния имеет первостепенный интерес для всего естествознания, а не только для наук о Земле.

В последнее время обозначился заметный прогресс в решении обратных задач нелинейной динамики для хаотических систем, правда, пока только для систем малой размерности, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями невысокого порядка, скажем не более чем 3–5. Говоря о восстановлении динамики применительно к климатическим задачам, следует с самого начала ориентироваться на усредненное описание климатических изменений, которое может осуществляться на языке обыкновенных дифференциальных уравнений, тогда как исходное гидродинамическое описание использует уравнения в частных производных.

Записи среднегодовой температуры Земли насчитывают 130 лет инструментальных исследований. Обработка температурных рядов показала, что размерность (число степеней свободы) земной климатической системы слишком велика (более 20), чтобы попытаться выявить в ней динамику. Выход за пределы инструментального периода в 130–150 лет приводит к необходимости иметь дело с природными термометрами: годовые кольца деревьев,

содержание радиоизотопов углерода и кислорода в растениях, материковых льдах и морских осадках.

Точность таких термометров достаточно высока, до градуса и менее, но температурных данных, к сожалению, недостаточно для построения количественных предсказаний на сколько-нибудь длительный срок. В итоге плодотворная на первый взгляд идея извлекать динамику непосредственно из наблюдательных данных натолкнулась на серьезное препятствие: отсутствие достаточно надежных и точных экспериментальных данных как на “ближних” временах в сотни лет, так и на более удаленных в тысячи, десятки и сотни тысяч лет. В этих условиях основные надежды на получение различных прогнозов возлагаются на испытанные традиционные методы: конструирование разумных предсказательных моделей на основе наблюдательных данных и теоретических разработок с последующим численным моделированием.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт математического моделирования климатических изменений показывает, что совершенствование предсказательных моделей приводит к выявлению все новых и новых механизмов взаимовлияния природных сред. Слабые на первый взгляд эффекты в конечном счете могут оказывать решающее воздействие на эволюцию климата. К таким эффектам принадлежит, в частности, термохалинная циркуляция в Мировом океане, ответственная, как сейчас думают, за колебания климата с периодом около

600–1000 лет, а также, возможно, и за ледниковые периоды.

Развитие предсказательных моделей встречает на своем пути значительные трудности, связанные в первую очередь с недостаточностью экспериментальных данных. Тем не менее и в этой области естествознания есть успехи, способствующие выработке оптимальной стратегии человечества в эпоху ускоренного индустриального развития.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кравцов Ю.А.* Земля как самоорганизующаяся климато-экологическая система // Соросовский Образовательный Журнал. 1995. № 1. С. 82–87.
2. *Birchfield E.G., Wang H., Rich J.J.* // J.Geophys.Res. 1994. Vol. 99(C6), P. 12459–12470.
3. *Toggweiler J.R.* // Phys. Today. 1994. Vol. 47(1). P. 45–50.

\* \* \*

Юрий Александрович Кравцов, профессор физического факультета Московского педагогического государственного университета, доктор физико-математических наук. Область научных интересов: теория волн, оптика, акустика, радиолокация, нелинейная динамика, статистическая радиофизика и дистанционное зондирование. Автор более 250 научных публикаций, в том числе 11 монографий.