

## ГЛОБАЛИСТИКА И ФУТУРОЛОГИЯ

*В.Б. БРИТКОВ,  
Л.В. ЕЗЕРОВА,  
Р.А. ПЕРЕЛЁТ*

## Системный анализ проблем глобального климата

Важность исследования глобальных проблем и, среди них климатических изменений, привела к использованию нового арсенала системного анализа: “системы систем”. Прослеживается эволюция климатического моделирования – от концептуальных до глобальных климатических моделей, моделей средней сложности и эмпирических моделей. Формирование сценариев изменения климата происходит путем изучения климатических факторов (динамики ледяного покрова Земли, вулканизма, солнечной активности, роли парниковых газов).

**Ключевые слова:** климат, изменения климата, глобальное потепление, система систем, моделирование климата, прогнозы климата, парниковые газы.

Importance of understanding such a new phenomenon on Earth as global problems and climate change as one among them, has led to the use of a new approach in systems analysis, known as ‘the system of systems’. The evolution of climate modeling is considered – from conceptual to global climate models and to those of intermediary complexity and empirical models. Climate factors play a significant role in modeling. Studying them – ice cover dynamics on the Earth, volcano and solar activity, the role of greenhouse gases-scenarios of climate change are made.

**Keywords:** climate, global problems, climate change, climate modeling, climate warming, system of systems, greenhouse gases.

### Развитие анализа сложных систем

Глобальные климатические изменения – одна из сложных проблем для нашей планеты. Сначала их отнесли к экологическим проблемам, потом оказалось, что они связаны с энергетикой, производством и потреблением, транспортом, продовольственной безопасностью, жизнью в городах и сельской местности и, как говорится, далее везде. Как рассматривать климатические изменения, их суть, последствия для человечества, стран, да и каждого из нас?

Ученые стали задумываться над новым классом проблем, в которых трудно найти причинно-следственные связи, повторяемость и/или регулярность, определенность,

---

*Бритков Владимир Борисович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института системного анализа (ИСА) РАН.*

*Езерова Любовь Владимировна – инженер-исследователь ИСА РАН.*

*Перелёт Ренат Алексеевич – кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник ИСА РАН.*

простое объяснение, а политики их торопят [Геловани, Бритков, Дубовский, 2009]. “Профессиональные экспертные знания” в принципе признают необходимость учета фактора неопределенности будущего. Но они делают на него минимальные поправки (если вовсе не пренебрегают таковыми), ссылаясь на невозможность должным образом исследовать и оценить неопределенность в силу отсутствия знаний о ней. Появилась “постнормальная наука”, которая исходит из необходимости учета воздействия факторов и рисков неопределенности в полной мере, считая обязательным проведение анализа вариантов неопределенности [Кузнецова, 2012].

Канадский системщик Дж. Кей описал постнормальную науку как процесс признания потенциальных пробелов в знаниях и понимании, которые не могут быть решены иначе, чем через “перевороты” в науке, тем самым утверждая, что (между “переворотами”) не надо обязательно пытаться разрешить или отклонить противоречивые перспективы мира (основаны они на науке или нет), но вместо этого включить различные точки зрения в имеющийся процесс решения проблем. Большой вклад в парадигму “постнормальной науки” сделали С. Фунтович и Дж. Равец из Объединенного исследовательского центра Евросоюза в Испре (Италия) [Funtowicz, Ravetz, 2003].

Новые парадигмы системного анализа и системных технологий стали использоваться в моделировании будущего: такие подходы, как применение метода генерирования сценариев будущего развития событий в проблемной области независимыми экспертами (метод дельфийских оракулов), интеллектуальный анализ данных (Data Mining), управление “большими массивами данных” (Big Data), долгосрочное формирование будущего развития (Foresight), “обратное” прогнозирование (Back-casting), когда составляется желательный сценарий будущего видения мира и выявляются пути его достижения, и, совсем недавно, парадигму “системы систем”.

Нарастание числа источников информации усложняет возможность восприятия человеком полученных данных. Ранней реакцией на это явление были попытки агрегировать данные. Необходимо разрабатывать интерфейс между человеком и современными системами обработки данных – между сознанием человека и большими массивами данных. При этом движение должно быть встречным: нужно разрабатывать технологическую компоненту взаимодействия и одновременно готовить специалистов к этому взаимодействию, подбирать аналитиков с соответствующими способностями и развивать их.

Решение по стыковке аналитических систем и человека должно находиться в соответствующей предметной области. Чтобы аналитик правильно интерпретировал представляемые ему агрегаты, он должен быть специалистом в той области, из которой поступают данные [Поляков, 2012].

Правительство, промышленность и наука сталкиваются с все более усложняющимися проблемами: финансовыми кризисами, развитием и распространением новых технологий, потерей биоразнообразия, климатическими изменениями. Для решения этих проблем требуются разнообразные, эволюционирующие, гетерогенные, распределенные системы, включаемые в сети на разных уровнях. Идут поиски целостной структуры для лиц, принимающих решения, чтобы определить, являются ли инфраструктурные, оперативные, стратегические, экономические и/или технологические компоненты эффективными или неэффективными или не имеющими значения во времени, так как решения связаны с вовлечением больших ресурсов и денежных средств и касаются не только нынешнего общества, но и будущих поколений. Речь идет о математическом моделировании и целенаправленных структурах для создания “систем систем”, которые состоят из множества распределенных и разнородных систем, каждая из которых выполняет независимые и полезные функции, объединенных для формирования характеристик, не обладаемых отдельными системами.

Что отличает “систему систем” (далее СС) от других крупных систем? СС – сложное множество рассредоточенных, компонентных, самостоятельных систем, соединенных в единую интегрированную систему, создающую новое качество и способность решать поставленные задачи. Это может быть, например, система управления

транспортными потоками или система предупреждения и мониторинга глобальных климатических изменений.

У СС три основные черты: ее физически рассредоточенные в пространстве системы, ее основная функциональная зависимость от связей между рассредоточенными системами и системная разнородность. Можно выделить и пять общих для СС характеристик:

- оперативная независимость компонентных (составляющих) систем: если разделить “систему систем” на компонентные системы, каждая из них может функционировать самостоятельно;

- управленческая независимость систем: компонентные системы не только *могут* работать независимо друг от друга, они *работают* независимо. Компонентные системы отдельно приобретаются и включаются в СС, но поддерживают постоянное оперативное существование независимо от нее;

- географическая рассредоточенность: географические масштабы компонентных систем широки. Данное свойство является относительным по мере расширения коммуникационных возможностей, но, как минимум, это означает, что компоненты могут легко обмениваться информацией, а не существенным количеством материи или энергии;

- эмергентное поведение: система выполняет функции и осуществляет цели, которые не присутствуют в компонентных системах. Основные предназначения СС выполняются этим видом поведения;

- эволюционное развитие: СС находится в развитии и не представляется полностью сформированной. Ее развитие и существование эволюционирует с функциями и задачами, которые добавляются, удаляются и изменяются с накопленным опытом. Причем сложность СС от этого не увеличивается, а составные системы не требуется модифицировать. Дело в том, что эволюция СС по пути ее усложнения может привести к появлению новых рисков, из-за которых она способна разрушаться. Большое внимание уделяется проблеме стыковки компонентных систем (интерфейсу). Усиливается роль стандартов стыковок между системами не только в узкотехнологическом смысле, а на основе практики взаимодействия с учетом социальных, управленческих, политических и культурных факторов.

СС – результат развития современных коммуникаций и компьютерной техники. По-видимому, кооперативные и виртуальные СС станут более распространенными вместе с повсеместностью независимо работающих и управляемых интеллектуальных систем [Maier, 1997; Boardman, Sauser, 2006].

Относительно недавно появилось такое определение СС – это “множество систем, образованных из независимых систем, интегрированных в более крупную систему, которая обеспечивает особые характеристики и свойства” [Defense... 2011; Systems... 2008].

В приведенной выше трактовке мир представляет собой сложную социально-техническую систему, функционирующую в контексте природно-климатической системы. Произведенные человеком инфраструктуры, такие как, например, энергетические и транспортные сети, опоясывают планету материальными и энергетическими потоками и вписываются в геологический, химический и экологический планетарный контекст СС. Социальные сети в виде интернет-торговли охватывают Землю информационными потоками. Мы живем и работаем внутри сложной, динамичной и взаимосвязанной СС ценой в 54 трлн долл. США (см. рис. 1).

Хотя составляющие части этих глобальных социальных и технических систем сознательно разрабатываются и управляются, вся эта СС спонтанна: у нее нет центрального координатора или менеджера. Спонтанность не остается без последствий: человечество в настоящее время сталкивается с серией глобальных вызовов, таких как истощение ресурсов, включая сокращение биоразнообразия, перенаселение планеты, загрязнение окружающей среды и климатические изменения. Решение данных проблем требует активной политики и управления соответствующими социально-техни-

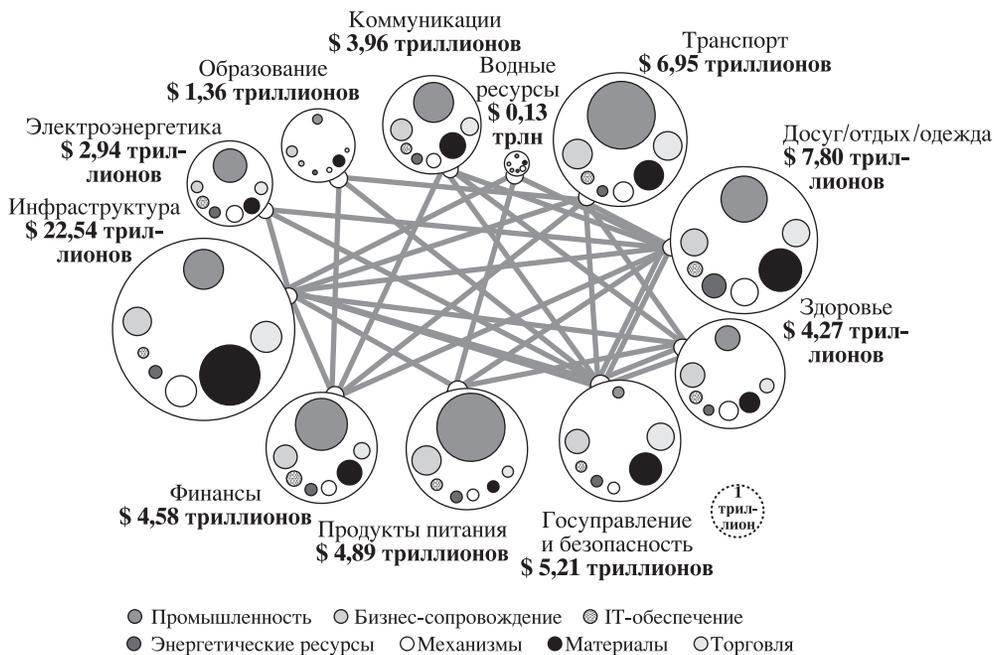


Рис. 1. Мировая система систем.

Источник: [Worlds's... 2010, p. 3].

Примечание: размер окружностей соответствует экономической ценности отрасли.

ческими СС. Получила развитие концепция устойчивого развития и, совсем недавно, перехода к “зеленой” экономике и “зеленому” росту [Перелёт, 2011].

Но как следует разрабатывать политику, если политики и менеджеры имеют ограниченный диапазон контроля над более мелкими частями глобальной системы систем? Вот здесь и появляется новая роль информационных технологий и объектного моделирования для понимания нашего мира как сложной системы и создания эффективной политики. Методологии СС уже получили распространение, начиная с работ на основе системного мышления до кооперативного информационного управления и объектного моделирования. Метод СС используется для учета климатических изменений в экономике: для моделирования перехода на “зеленую” экономику при переходе на низкоуглеродную энергетику.

Основным результатом субъектно-ориентированного моделирования является то, что при определенной стоимости  $CO_2$  – используя налог или цену квоты на выбросы  $CO_2$ , – углеродное налогообложение приводит к снижению цен на электроэнергию больше, чем в случае торговли квотами на выбросы, предусмотренными Киотским протоколом [Chappin, Dijkema, Vries, 2010]. Основная причина этого – различие в инвестиционных рисках: налог более предсказуем, чем рыночные цены на квоты  $CO_2$ . Неопределенность учитывается в принятии инвестиционных решений через более высокие ставки дисконта и приводит к увеличению доходности инвестиций. Кроме того, рыночные цены на  $CO_2$ , как правило, приводят к появлению инвестиционных циклов, которые вызывают нестабильность в портфеле заказов производителя энергии. Предсказуемость оказывается ключевым преимуществом в налогообложении, позволяя инвесторам минимизировать издержки в течение более длительного периода времени. Набор инструментов политики помогает понимать эволюцию и возможности комплексной СС, которые составляют инфраструктуру энергетики.

Описанные инструменты и методология используют “большие массивы данных” (Big Data), совместное управление информацией для построения подробных субъектно-ориентированных моделей социально-технических СС. Это – итеративный процесс, позволяющий лучше понять поведение человека и его взаимодействие с технической и природной средами. Распространенное ошибочное представление о рассмотренных выше процессах состоит в том, что они якобы нацелены на предсказание будущего и поэтому обязательно обречены на провал. Вместо этого, цель таких исследований состоит в улучшении понимания нами реальности, чтобы принимать “менее плохие” решения.

Несомненно, будет продолжаться создание моделей реальности и, возможно, жизнь на их основе и даже в них. Эвристика и текстовые изложения поведения полезны, когда нам нужно принимать решение с неполной информацией. Есть надежда, что, имея больше данных, используя более интеллектуальные инструменты исследований и принятия решений [Бритков, Булычев, Ноздрин, 2012], мы сможем согласовать наши индивидуальные иррациональности в более объективное, основанное на данных понимание нашей окружающей среды, и улучшить механизм принятия решений. Для более эффективного анализа социально-технических систем приходится создавать более адекватные социально-технические СС [Chmieliauskas... 2012]. При создании природно-социальных моделей климатических изменений важную роль играют климатообразующие факторы. Их правильный учет ведет к разработке и применению адекватных экономических, финансовых, институциональных и правовых мер.

Далее рассмотрим климатообразующие факторы, на основе которых происходило создание физических моделей климата Земли. Международная геосферно-биосферная программа в своей деятельности стала использовать модели Международной программы человеческого измерения глобальных изменений. Примерно в таком же направлении шли моделирование и мониторинг климатических изменений на страновом уровне. Тем не менее использование “больших данных” и сложных систем пока еще не привело к разработке СС социально-экономического развития с учетом климатических изменений.

### **Анализ “сложных систем” на примере прогнозов климата Земли**

Сложность задачи прогноза климата связана с неоднозначностью оценки и взаимодействия множества климатообразующих факторов (см. табл.), множеством отрицательных и положительных обратных связей. Для системного анализа климата самое важное – правильно оценить степень воздействия каждого фактора на систему. Оценка факторов сегодня – область бурных научных дискуссий. При этом все перечисленные факторы относительно независимы в рамках сложной системы глобального климата. Их поведение спонтанно, а влияние на “большую систему” и несомненно, и зачастую непредсказуемо. Продемонстрируем это на нескольких примерах.

Рассмотрим вулканизм – важный климатообразующий фактор, который не раз корректировал историю цивилизации. Вулканический пепел, поднимаясь в высокие слои атмосферы, может оставаться там в течение нескольких лет, препятствуя проникновению солнечной радиации и вызывая похолодание. Вулканы совершенно непредсказуемы. Особенно опасны вулканы взрывного типа. Извержения оцениваются по 8-балльной шкале. Каждый следующий балл означает, что извержение в 10 раз превышает оцененное предыдущим баллом. Вулканы многократно вмешивались в человеческую историю. Например, правление Бориса Годунова ознаменовалось катастрофическим похолоданием с летними заморозками 1600–1603 г., которые, как теперь выяснилось, были вызваны мощным извержением вулкана на территории Перу. 15 июня 1991 года на Филиппинах (о. Луссон) взорвался вулкан Пинатубо. Было выброшено более 30 млн *t* диоксида серы на высоту 24 км. Экваториальные области покрыло облако пепла, температура снизилась на 0,3 градуса (для сравнения: за последнее столетие – температура поднялась на 0,6 градуса). Более сильное извержение – Кракатау в 1883 г. (Зондский пролив между Явой и Суматрой). Высота выброса пепла – 80 км.

## Климатообразующие факторы

- \* географическая широта (из-за формы Земного шара на различных широтах угол падения солнечных лучей различен, что влияет на степень прогревания поверхности и, следовательно, воздуха);
- \* подстилающая поверхность (характер рельефа, особенности ландшафта, леса);
- \* воздушные массы (в зависимости от их свойств определяется сезонность выпадения осадков и состояния тропосферы);
- \* солнечная радиация и солнечная активность, которая влияет на состояние озонового слоя или просто на общее количество излучения;
- \* влияние океанов и морей (если местность отдалена от морей и океанов, то увеличивается континентальность климата; наличие рядом океанов смягчает климат местности, исключение – наличие холодных течений);
- \* изменение наклона оси вращения Земли (прецессия и нутация);
- \* изменение эксцентриситета орбиты Земли;
- \* изменения состояния земного ядра, влекущие за собой изменения магнитного поля Земли;
- \* извержения вулканов;
- \* деятельность ледников;
- \* перераспределение газов на планете;
- \* выделение газов и тепла из недр планеты;
- \* изменение отражающей способности атмосферы;
- \* катастрофы внеземного происхождения (например, падение астероидов);
- \* деятельность человека (энергетика, промышленность, строительство, сельское хозяйство, транспорт, города, сведение лесов и т.д.).

Цунами высотой волны 30 м. Для сравнения: недавнее цунами, жертвой которой стала Фукусима (Япония) в 2011 г., – 13 м. Влияние извержения зависит от расположения вулкана. В высоких широтах извержение влияет на одно полушарие. В низких (ближе к экватору) – на весь Земной шар. Если говорить о сегодняшнем дне: аномальные морозы в Сибири на Дальнем Востоке зимой 2012–2013 гг. усилились (сравнительно небольшим) выбросом пепла вулкана Ключевская Сопка.

Особо впечатляющий пример – озеро Тоба – кратер вулкана Тоба (о. Суматра), который взорвался 73 тыс. лет назад. Сила извержения 8 баллов. Математическая модель извержения дает масштаб охлаждения северного полушария на 3,5 градуса в течение 10 лет. Наступил ледниковый период. Тогда планета колебалась от межледниковья к ледниковью, и слабеющей климатической системе был нанесен удар. Когда аэрозоль рассеялся, мощность ледников была такова, что климатическая система не сумела восстановиться, и ледниковый период продлился еще 60 тыс. лет [Никонов, 2007].

Сильные извержения часто связывают с влиянием крупных планет. По одной из версий, причина нынешнего глобального потепления – вулканическое спокойствие XX в. Н. Чумаков считает, что вспышки внутриплитного (мантийно-плюмового) вулканизма с массовым излиянием базальтов приводят к глобальному потеплению за счет парникового эффекта, а усиление надсубдукционной эксплозивной вулканической деятельности провоцирует похолодание климата из-за выброса в атмосферу большого количества аэрозолей, что ослабляет солнечную радиацию [Чумаков, 2001].

Другой важный фактор климатообразования – солнечная активность. Пятна на Солнце были известны китайцам в 165 г. до н.э. С времен изобретения телескопа человечество наблюдало за пятнами непрерывно. Немецкий астроном Г. Швабе обнаружил 11-летнюю цикличность в появлении пятен. Известен Маундеровский минимум (см. рис. 2), когда пятен было не более 50 (в 1000 раз меньше обычного) в течение 70 лет. В это время среднезимние температуры снизились на 1–1,5 градуса, среднегодовые – на 0,5 градуса. Эти годы оказались самыми холодными за последние 2000 лет. Тем не менее долго считалось (исходя из визуальных ощущений), что пятна имеют меньшую температуру, чем основная поверхность Солнца. В 1978 г. новые данные со

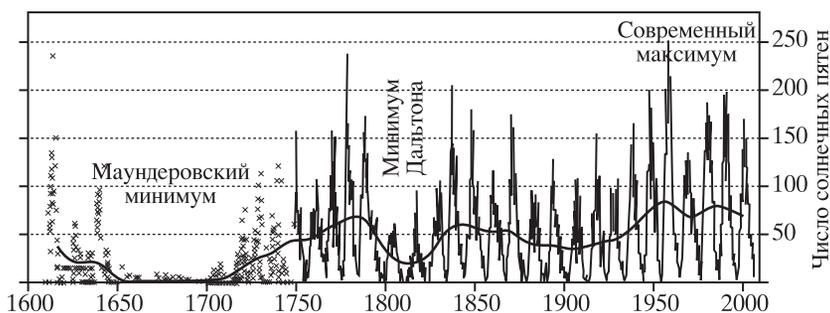


Рис. 2. Число пятен на Солнце за 400 лет.

Источник: [Rohde, 2006].

спутника Нимбус-7 (США) опровергли предположение, что чем больше пятен на Солнце, тем оно холоднее. Парадокс Маундеровского минимума получил подтверждения современными методами измерения. По прогнозам наступивший век – век глубокого и продолжительного солнечного минимума, напоминающего маундеровский. Он должен наступить не позднее 25-го солнечного цикла (2020 г.) и продлится до конца столетия. Это может напомнить холодную петровскую эпоху [Никонов, 2007].

По данным В. Котлякова, солнечная активность увеличилась примерно на 30% за время существования Земли. Но изменения климата не были напрямую связаны с изменениями солнечной активности. Наиболее заметно оно проявляется в масштабе столетий, но в последние 50 лет практически неразличимо. При этом прогнозирование солнечной активности практически невозможно, а ее влияние на климат тоже трудно оценить однозначно (см. [Абдусаматов, 2010]).

Отдельно остановимся на вопросе динамики ледового покрова Земли как важной составляющей климатической системы. Предмет обсуждения – материковые льды, так как горные ледники составляют лишь около 1% ледового покрова Земли. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) прогнозируют таяние материковых льдов и повышение уровня Мирового океана. Эта точка зрения принята за основную для работы природоохранных, общественных организаций и влияет на политику, часто пробуждая панику.

В последние 10 лет площадь однолетних льдов Арктики уменьшилась на 40%, а толщина, в среднем, с 2 до 1,4 метров. Спутниковые данные по Земле Франца Иосифа и северному острову Новой Земли свидетельствуют, что происходит уменьшение толщины льдов. Ледники Арктики отступают. Но для прогнозов, что льды исчезнут, оснований нет, потому что мы не знаем, как будет меняться климат [Котляков].

К счастью, науки о Земле не стоят на месте. Скважину в Антарктиде бурили около 30 лет. Из нее получены образцы льда. Эти образцы хранятся и обрабатываются: был специальный советско-французско-американский проект, где Россия занимала главенствующее положение. В этих исследованиях участвовал Институт географии РАН. В результате был реконструирован климат на Земле за прошлые 420 тыс. лет и получены выдающиеся результаты (см. рис. 3). Они таковы: климат на Земле циклически менялся примерно через 100 тыс. лет. В периоды межледниковья – мы и сейчас в таком живем – температура была примерно как сейчас и выше, и это же время характеризуется большим количеством газов в атмосфере, а в холодные периоды ледниковья газов гораздо меньше. Это соответствие большого количества парниковых газов – углекислого газа и метана – всегда связано с температурой. Чем выше температура, тем больше газов, чем ниже – тем газов меньше. При этом совершенно невозможно утверждать, что климат был более теплым потому, что было больше газов. Все наоборот: газов было больше, когда климат был теплее.

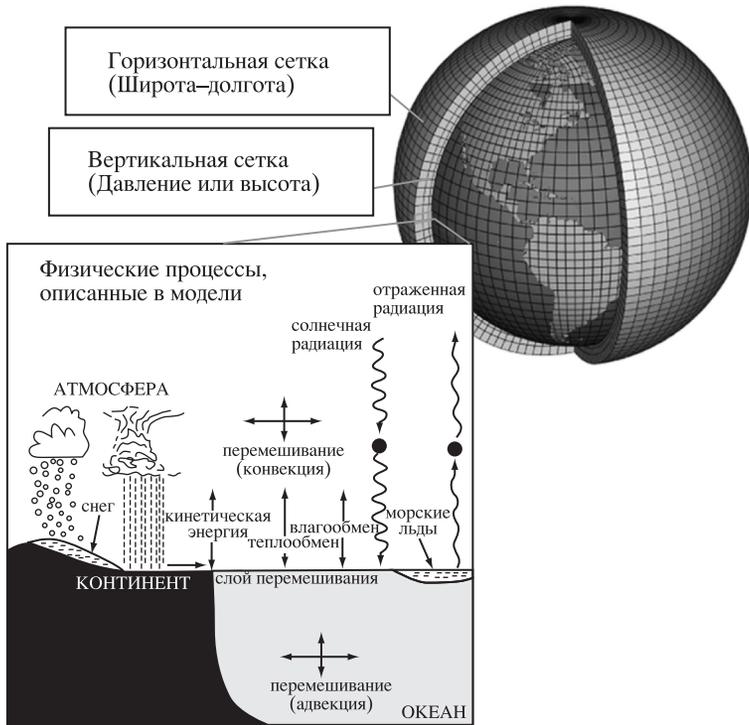


Рис. 3. Структура глобальной климатической модели.

Источник: [Rohde, 2006].

То, как меняется климат, известно давно, это изучалось на базе морских осадков, кривая, полученная после анализа антарктических льдов, просто не расходится с этими данными. Но исследования древней атмосферы, парниковых газов до этого никто не делал, потому что только изо льда можно получить эти результаты, только во льду сохранилась древняя атмосфера в виде пузырьков. По пузырькам воздуха, сохранившихся сотни тысяч лет, можно судить о составе воздуха в древности. Химический и изотопный состав ядер, добытых из скважин, дает уникальную информацию. Изотопное соотношение  $^{18}\text{O}$  и  $^{16}\text{O}$  в осадках, выпавших в Антарктиде и слежавшихся в лед, четко коррелирует с температурой. Пыль в определенных слоях позволяет судить о периодах крупных извержений.

Температура коррелировала с  $\text{CO}_2$ . Она повышалась, и океан выделял, как следствие его нагревания, больше  $\text{CO}_2$  и других газов. Политик А. Гор узнал про эту корреляцию и решил использовать ее в политике, а именно, в борьбе с промышленностью. Только бывший вице-президент США опустил тот факт, что сотни тысяч лет колебания происходили БЕЗ всякого участия промышленности! Как видим, климат снова выступает как резонансная общественная проблема.

### Современное состояние климатического моделирования

Развитие климатологического моделирования началось в середине XX в. с создания зональной энерго-балансовой модели, или модели Селлера–Будыко, в которой изменения температуры связаны не только с изменениями солнечной радиации, но и с интенсивностью обратной связи между льдами и тепловым балансом. Модель учитывала существование обратных связей – положительных и отрицательных –

в климатической системе и сыграла важную роль в создании концепции потепления климата на Земле вследствие повышения концентрации углекислого газа в атмосфере.

Модели могут быть от относительно простых до достаточно сложных в зависимости от детальности проработки параметров, составляющих их основу. Тип модели зависит от того, что именно нас интересует в конкретном случае. Иногда достаточно использовать относительно простые **концептуальные модели**, способные работать на обычном компьютере или даже существовать в аналитической форме. Они учитывают процессы в целом (например, формирование глубоководных слоев океана) и описывают базовые динамические процессы, формирующие климат. Такие модели дают сведения об обобщенных климатических изменениях и механизмах обратных связей. Однако они слишком упрощают систему и не могут применяться для описания всего разнообразия процессов, происходящих на Земле.

На другом полюсе от простых моделей находятся комплексные **глобальные климатические модели** (ГКМ), такие как общие расчетные модели, которые требуют суперкомпьютеров, и расчеты небольшого прогноза иногда занимают много времени. Эти модели включают точное описание известных процессов (циркуляции, осадков, динамики ледового покрова и т. д.). Атмосфера, океан и ледовый покров представлены трехмерной сеткой, в узлах которой происходит расчет всех параметров. Как правило, шаг сетки не превышает 500 км (а в моделях высокого разрешения 25 км). Результаты расчетов используются для детального описания климата на конкретной территории, восстановления климата прошлого и прогноза будущих возможных сценариев. Большие вычислительные мощности, требующиеся при расчетах, иногда делают затруднительным анализ всех комбинаций процессов и параметров, особенно при долгосрочных прогнозах.

Между этими двумя видами моделей (наиболее простой и наиболее сложной) расположились **модели средней сложности**, не требующие применения суперкомпьютеров. Поэтому они применяются чаще, например, для проверки различных гипотез и расчетов эволюции древнего климата Земли на миллионы лет назад. Они обычно описывают больше процессов, чем концептуальные модели (рассматривающие некоторые процессы упрощенно), но меньше, чем глобальные модели общей циркуляции (требующие большого времени расчета и трудоемкого обеспечения функционирования). Модели средней сложности часто включают компоненты земной системы, такие как ледовый покров, который в настоящее время не входит в большинство глобальных моделей. Однако в них часто могут отсутствовать важные части, а разрешение этих моделей не позволяет описывать региональный климат.

Методологии сложных систем, включая СС, наиболее близки глобальные климатические модели ГКМ, состоящие из взаимодействующих друг с другом моделей атмосферы, океана, верхних слоев суши, криосферы и биосферы. Они основаны на теоретических уравнениях состояния атмосферы и океана.

В настоящее время заметный прогресс в области моделирования и разработки информационных технологий, в частности суперкомпьютеров, позволяет применять глобальные модели высокого разрешения. Например, в рамках проекта Всемирной климатической исследовательской программы сотрудничают более 20 мировых климатологических центров, которые используют около 50 климатических моделей. Такие модели позволяют осуществлять глобальные расчеты с пространственным разрешением 25 км.

Приведем пример модели другого сорта – эмпирической глобальной модели. В отличие от большинства глобальных моделей, модель В. Клименко (лаборатория глобальных проблем энергетики Московского энергетического института) строится на натуральных данных. Коэффициенты подобраны на основании наблюдений. Модель комплексная, учитывает множество климатических факторов:

- движение тяжелых планет;
- поведение Солнца;

- положение Земли на орбите;
- вулканическая активность;
- количество парниковых газов.

Сбор данных требует огромных усилий: каждый месяц нужна информация по добыче нефти и газа, площади пахотных земель, болот, поголовье овец, производстве сахарного тростника и пр. Скота в мире – миллиарды голов. Его воздействие по выделению метана сравнимо с воздействием болот, выделяющих метан. Выбросы углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) вычислить проще: это сжигание топлива. У метана 10 источников по 10% каждый, и еще существуют 30 парниковых компонентов (фреон, производство пенополиуретана и пр.). Модель непростая математически, ее разработка длилась 12 лет. В 1994 г. лаборатория Клименко впервые опубликовала прогноз климатических изменений до 2005 г. Для 5–10-летних средних температур прогноз сбился с точностью  $0,02^\circ\text{C}$  (то есть с точностью измерения среднеполюсарной температуры). Прогноз Клименко давал  $+0,4^\circ\text{C}$  от климатической нормы. Западные модели давали прогноз  $+1-2^\circ$  (ошибка в 2–4 раза) [Klimenko, Tereshin, 2010].

Однако климат – сложнейшая система множества взаимодействующих факторов с положительными и отрицательными обратными связями, предсказуемость которых даже с помощью ГКМ пока не достигла желаемого результата. Все зависит от того, какие начальные условия заложены в ГКМ, притом что многие из этих условий недостаточно изучены (например, степень влияния парниковых газов). Но человечеству необходимо двигаться вперед в направлении изучения климата как важнейшего фактора, влияющего на человека и общество. Развитие и изучение таких сложных глобальных систем – новый шаг человечества в науке.

\* \* \*

Итак, сейчас в научном сообществе и политике преобладает концепция, утверждающая, что климатические изменения – результат сочетания природной и заметной антропогенной активности, приводящей к росту выбросов парниковых газов и потеплению нашей планеты. Этой концепции придерживается МГЭИК. На основе такого подхода, реализованного в Рамочной конвенции по изменению климата и Киотского протокола к ней, государства и крупнейшие международные организации выступают за деятельность по снижению антропогенной компоненты концентрации парниковых газов (среди которых  $\text{CO}_2$  – основной антропогенный фактор, вызываемый сжиганием ископаемого топлива) в атмосфере путем снижения выбросов  $\text{CO}_2$ , депонирования  $\text{CO}_2$  лесами, борьбы с лесными пожарами и адаптации к климатическим изменениям. На ежегодном собрании Американского геофизического союза (США) ученые представили доказательства того, что изменения климата идут более быстрыми темпами, чем они представляли 15, 10 или даже 5 лет назад. После короткого перерыва, в основном из-за экономического спада, глобальные выбросы парниковых газов растут снова. Арктический морской лед отступает с беспрецедентной скоростью, уровень океана поднимается быстрее, чем ожидалось, и растет температура поверхности океана, что влияет на тропические штормы и ураганы [Mobilizing... 2013]. Такому подходу соответствуют принимаемые политические решения. Генеральный секретарь ООН Пан Ги Мун называет изменение климата “определяющим вопросом нашего времени” [Руководство... 2013].

Проблема изменения климата стала одной из тем инаугурационной речи президента США. По словам Б. Обамы, не обращать внимания на эту угрозу “значит предать интересы своих детей и следующих поколений” [Obama’s... 2013]. В июне 2013 г. президент США объявил программу действий по сокращению выбросов углекислого газа. Генеральный план Обамы, в числе прочих мер, включает введение лимита на выбросы электростанций и поддержку альтернативных источников энергии [President’s Climate... 2013].

В Климатической доктрине России отмечается “признание способности антропогенного фактора оказывать воздействие на климатическую систему, приводящие к значимым, в первую очередь неблагоприятным и опасным для человека и окружающей среды, последствиям” [Утверждена... 2009]. Консолидированный взгляд российских ученых-естественников и экономистов, пожалуй, лучше всего выражен в [Оценка... 2011]: “На фоне непрекращающихся споров о причинах изменения климата дестабилизирующее воздействие этих изменений на природные системы и экономику многих стран мира, включая Россию, становится все более очевидным”. Основное направление действий в этой работе ориентировано на адаптацию и, в том числе, снижение уязвимости к изменениям климата. При этом отмечается: “Что касается антропогенного воздействия на климат, при любом сценарии снижение выбросов парниковых газов способно в лучшем случае ограничить масштабы антропогенных изменений климата и их последствий, но не устранить их полностью” [Оценка... 2011, с. 5, 183]. В Климатической доктрине четко признается роль парниковых газов и их антропогенной составляющей: “Российская Федерация максимально концентрирует усилия на снижении антропогенных выбросов парниковых газов и увеличении их абсорбции поглотителями и накопителями” [Утверждена... 2009, ст. 23 и 24].

Для принятия политических решений и выделения финансирования очень важны результаты научных исследований. В настоящее время значительное внимание уделяется построению моделей климатических изменений в будущем. Требуется новое поколение моделей для комплексной оценки (МКО), сочетающее как факторы, так и последствия изменений климата в рамках общих основ моделирования. В центре МКО находятся компоненты нынешней и прогнозируемой будущей деятельности человека и их потенциальное влияние на климатическую систему. МКО включают связи между изменениями в природной климатической системе и деятельностью человека, в том числе той, которая смягчает изменения климата, чтобы адаптироваться к ним и их последствиям [US GlobalChange... 2013]. Отмечается, что последние климатические модели не учитывают дополнительного потепления, вызванного выделениями метана при таянии вечной мерзлоты и из континентального шельфа. Это означает, что общепринятые прогнозы на ближайшие десятилетия почти наверняка не представляют собой наихудшие сценарии [US Federal... 2013]. В то же время появляются новые подходы к объяснению климатических изменений, например, гипотеза возникновения ветров, и макроподходы к использованию концепции СС, которые, несомненно, будут учтены в дальнейших исследованиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдусаматов Х.* На Земле потеплеет лишь в начале XXII века. 2010 (<http://news.mail.ru/society/4776499/>).
- Бритков В.Б., Булычев А.В., Ноздрин Ю.В.* Системный анализ комплексов моделей сложных систем // IX Всероссийская школа-семинар “Прикладные проблемы управления макросистемами”. Апатиты. Материалы докладов. КНЦ РАН. 2012.
- Геловани В.А., Бритков В.Б., Дубовский С.В.* СССР и Россия в глобальной системе: “1985–2030” (Результаты глобального моделирования). М., 2009.
- Котляков В.М.* Ледники Арктики отступают // Периодическое издание Северный (арктический) федеральный университет: Арктический вектор (<http://narfu.ru/av/archive/719/13555/>).
- Кузнецова О.* Современные западные подходы к оценке международно-политических рисков. 2012 (<http://www.intertrends.ru/four/004.htm>).
- Никонов А.П.* История отможенных в контексте глобального потепления. М., 2007.
- Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу. М., 2011.
- Перелёт Р.А.* Направления стратегии “зеленого роста” // Евразийский экономический обзор. 2011. № 1.
- Поляков К.* Большие данные: в чем проблема? // Директор информационной службы. 2012. № 4 (<http://www.osp.ru/cio/2012/04/13015322/>).
- Руководство деятельностью, связанной с изменением климата. М., 2013 (<http://www.un.org/ru/climatechange/sg.shtm/>).

Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. М., 2002.

Утверждена Климатическая доктрина Российской Федерации. 2009 (<http://www.kremlin.ru/acts/6365>).

Чумаков Н.М. Общая направленность климатических изменений на Земле за последние 3 млрд лет // Доклады АН. 2001. Т. 381. № 5 ([http://sivatherium.narod.ru/library/Climate/glava\\_13.htm](http://sivatherium.narod.ru/library/Climate/glava_13.htm)).

Boardman G., Sourser B. System of Systems – the Meaning of Of. IEEE International Conference on System of Systems Engineering. Los Angeles. April 24–26.

Chappin E.J.L., Dijkema G.P.J., Vries L.J. Carbon Policies: do They Deliver in the Long Run? // Carbon Constrained: Future of Electricity, Global Energy Policy and Economic Series. Elsevier, 2010.

Chmieliauskas A., Emile J., Chappin L., Chris B., Nikolic I., Gerard P.J., Dijkema P. New Methods for Analysis of Systems-of-Systems and Policy: the Power of Systems Theory, Crowd Sourcing and Data Management, System of Systems. 2012 (<http://www.intechopen.com/books/system-of-systems/new-methods-for-analysis-of-systems-of-systems-and-policy-the-power-of-system-theory-crowd-sourcing>).

Defense Acquisition Guidebook // Defense Acquisition University. Virginia (USA), 2011 (<https://acc.dau.mil/CommunityBrowser.aspx?id=332957>).

Funtowicz S., Ravetz J. // Post-normal Science. 2003 ([http://leopold.asu.edu/sustainability/sites/default/files/Norton,%20Post%20Normal%20Science,%20Funtowicz\\_1.pdf](http://leopold.asu.edu/sustainability/sites/default/files/Norton,%20Post%20Normal%20Science,%20Funtowicz_1.pdf)).

Klimenko V., Tereshin A. World Energy and Climate in the Twenty-first Century in the Context of Historical Trends: Clear Constraints to the Future Growth // Journal of Globalization Studies. 2010. Vol. 1. № 2 ([http://www.socionauki.ru/journal/files/jogs/2010\\_2/world\\_energy\\_and\\_climate.pdf](http://www.socionauki.ru/journal/files/jogs/2010_2/world_energy_and_climate.pdf)).

Maier M. Architecting Principles for Systems of Systems. 1997 (<http://www.infoed.com/Open/PAPERS/systems.htm>).

Mobilizing Scientists on Climate Change // Washington Post. January 17, 2013 ([http://articles.washingtonpost.com/2013-01-17/opinions/36410396\\_1\\_climate-change-alternative-energy-scientists](http://articles.washingtonpost.com/2013-01-17/opinions/36410396_1_climate-change-alternative-energy-scientists)).

Obama's Second Inaugural Speech. January 21, 2013 ([http://www.nytimes.com/2013/01/21/us/politics/obamas-second-inaugural-speech.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/2013/01/21/us/politics/obamas-second-inaugural-speech.html?_r=0)).

President's Climate Action Plan. June 2013 (<http://www.washingtonpost.com/r/2010-2019/WashingtonPost/2013/06/24/National-Politics/Graphics/Presidents+Climate+Action+Plan.pdf>).

Ronde R.A. Gallery of Solar Variability, Global Warming Art Project, 2006 ([http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Sunspot\\_Numbers\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Sunspot_Numbers_png)).

World's 4 Trillion Dollar Challenge. BM Institute for Business Value. New York. 2010 (<http://public.dhe.ibm.com/common/ssi/ecm/en/gbe03278ugen/JBE03278USEN.PDF>).

Systems Engineering Guide for Systems of Systems, 2008 // (<http://www.acq.osd.mil/se/docs/SE-Guide-for-SoS.pdf>).

US GlobalChange Research Program 2013 (<http://www.globalchange.gov/what-we-do/modeling>).

US Federal Advisory Committee Draft Climate Assessment Report 2013 (<http://ncadac.globalchange.gov/download/NCAJan11-2013-publicreviewdraft-appendix2-climateprimer.pdf> p. 1117).

© В. Бритков, Л. Езерова, Р. Перелёт, 2014

---

Сдано в набор 20.12.2013	Подписано к печати 05.02.2014	Дата выхода в свет 20 нечетн.		
Формат 70 × 100 <sup>1/16</sup>	Цифровая печать	Усл. печ.л. 14,3	Усл.кр.-отт. 4,8 тыс.	Уч.-изд.л. 18,6
Бум.л. 5,5	Тираж 327 экз.	Зак. 2074	Цена свободная	

---

Учредители: Российская академия наук, Президиум РАН

Адрес редакции: Мароновский пер., д. 26, Москва, 119049

Издатель: Российская академия наук. Издательство "Наука" РАН, Профсоюзная ул., 90, Москва, 117997

Оригинал-макет подготовлен АИЦ "Наука" РАН

Отпечатано в ППП «Типография "Наука"», Шубинский пер., д. 6, Москва, 121099