

С.А. Солдатенко, Р.М. ЮСУПОВ, Р.А. КОЛМАН  
**КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЩЕСТВА И ПРИРОДЫ В УСЛОВИЯХ  
БЕСПРЕЦЕДЕННО МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА**

*Солдатенко С.А., Юсупов Р.М., Колман Р.А. Кибернетический подход к проблеме взаимодействия общества и природы в условиях беспрецедентно меняющегося климата.* В статье с кибернетических позиций рассмотрена проблема взаимодействия природы и общества в условиях современного изменения климата, беспрецедентного по своим масштабам и темпам, вызванного антропогенной деятельностью. Представлена разработанная нами структура кибернетической системы «климат-экономика», проанализированы слабые стороны субъекта глобального управления и обсуждены основные причины неопределенностей оценок изменения климата и наносимого этими изменениями экономического ущерба. Отмечается, что адаптационные меры и стратегии, разрабатываемые и реализуемые правительствами разных стран и межправительственными организациями, не устраняют причины глобального потепления и, следовательно, имеют ограниченные возможности, поскольку человек и природа могут существовать только при определенных условиях окружающей среды, выход за пределы которых вследствие изменения климата может привести к глобальной биологической катастрофе. Решения в области климатической политики принимаются в условиях неопределенности, обусловленной неоднозначностью оценок будущего климата, что, в свою очередь, является следствием не совсем адекватного учета обратных связей в моделях климатической системы. С помощью малопараметрических моделей земной климатической системы проиллюстрировано влияние обратных связей в системе на значительные межмодельные расхождения оценок изменения климата, полученных посредством современных климатических моделей высокой степени сложности. Поскольку предлагаемые экспертами меры адаптации к изменению климата являются борьбой не с причиной, а со следствием, в качестве радикальной адаптационной стратегии нами видится геоинжиниринг. В отличие от ранее выполненных исследований, задача целенаправленной модификации климатических условий, реализуемая методами геоинжиниринга, рассматривается нами в рамках теории оптимального управления с математической формализацией целей геоинженерных воздействий и методов их достижения. В статье приведен пример постановки и решения оптимизационной задачи стабилизации климата Земли за счет инъекции в стратосферу мелкодисперсного сульфатного аэрозоля.

**Ключевые слова:** геофизическая кибернетика, глобальное потепление, экономика изменения климата, геоинжиниринг, климатический инжиниринг, обратные связи, оптимальное управление.

**1. Введение.** К числу глобальных проблем современности, затрагивающих жизненные интересы и судьбу всего человечества и требующих для своего решения консолидированных усилий всех государств мира, относится проблема изменения климата [1]. Результаты палеоклиматических исследований свидетельствуют о том, что климат нашей планеты менялся и в прошлом, когда периоды потепления многократно сменялись периодами похолодания [2]. Эти изменения были обусловлены многочисленными внутренними и внешними по отношению к земной климатической системе (ЗКС) факторами, такими

как, например, изменение параметров орбиты и оси Земли, вариации светимости солнца, миграция континентов и изменение их размеров и рельефа, изменение планетарного альбеда, изменение прозрачности и газового и аэрозольного состава атмосферы и других. Однако современное изменение климата имеет две характерные особенности. Во-первых, скорость происходящих в ЗКС изменений является беспрецедентной. Согласно сводному отчету Национального управления исследований океана и атмосферы США [3], начиная с 1880 года среднеглобальная приповерхностная температура воздуха (СПТВ) увеличивалась каждые 10 лет примерно на  $0,07^{\circ}\text{C}$ , но уже к концу 20 столетия скорость роста СПТВ достигла значений  $0,17^{\circ}\text{C}$  за декаду, то есть увеличилась более чем в два раза. Во-вторых, современное глобальное потепление является «рукотворным», поскольку его основная причина кроется в человеческой деятельности. Согласно Пятому оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [4], «весьма вероятно, что большая часть наблюдаемого повышения глобальной приземной температуры в период с 1951 года обусловлена влиянием человека». Известно, что одним из главных геологически значимых признаков антропогенной деятельности служит увеличение в атмосфере концентрации двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) – парникового газа (ПГ), вклад которого в глобальное потепление составляет примерно 65%. В течение последнего миллиона лет концентрация атмосферного  $\text{CO}_2$  варьировалась в пределах от 0,018% до 0,028%. С начала промышленной революции (~1850 год) вследствие сжигания ископаемого топлива уровень содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере постоянно увеличивался и к 2019 достиг 0,041% [5].

В целом имеет место научный и политический консенсус в оценке трендов изменения климата и причин, порождающих это изменение, что закреплено в докладе МГЭИК [4] и недавно опубликованном отчете, подписанном более чем 11 тысячами ученых из 153 стран, включая Россию [6]. На сегодняшний день степень достоверности имеющихся оценок относительно определяющей роли антропогенного фактора в современном изменении климата (в сторону потепления) составляет 99,99995% или 5 «сигм», что соответствует так называемому «золотому стандарту» [7]. Однако имеются сторонники «климатического скептицизма», отвергающие антропогенные причины происходящих климатических изменений. По их мнению, наблюдаемое изменение климата – естественный процесс. В сентябре 2019 года было опубликовано письмо под названием «There is no climate emergency» [8], которое подписали 500 «климатических скептиков» и адресовали его Организации Объединенных Наций (ООН). И хотя некоторые издания назвали подписантов

этого письма экспертами в области климатологии, большинство из них таковыми не являются, поскольку значительная их часть – инженеры и специалисты в областях, очень далеких от науки о климате, лишь 10 подписантов назвали себя климатологами.

Поскольку факты, свидетельствующие о потеплении нашей планеты, являются неоспоримыми, возникает проблема оценки влияния современных изменений климата на общество, что подразумевает, прежде всего, научно-обоснованную осведомленность ученых и политиков о возможных сценариях изменения климата в обозримой перспективе. Научные представления о том, как ЗКС продолжит свою эволюцию под влиянием естественных и антропогенных факторов, основываются на результатах численного моделирования с применением чрезвычайно сложных математических моделей климата [9, 10]. Тем не менее разработчики подобного рода моделей признают их ограниченность ввиду невозможности построения «идеальной» модели ЗКС [11, 12]. Однако наряду с «неидеальностью» климатических моделей на достоверность получаемых с их помощью перспективных оценок будущего климата существенное, если не сказать определяющее, влияние оказывают сценарии антропогенных возмущающих воздействий на ЗКС, которые задаются, как правило, априори исходя из неких эвристических соображений. Прежде всего, это касается сценариев будущего изменения содержания в атмосфере радиационно-активных газов и аэрозолей. Дискретный характер моделей климата, несовершенство параметризационных схем, описывающих физические процессы, а также неоднозначность сценариев антропогенного воздействия на ЗКС порождают значительную неопределенность возможного будущего состояния климата, получаемого с помощью компьютерного моделирования [4].

Альтернативные варианты возможного изменения климата, рассматриваемые для различных сценариев антропогенного воздействия на ЗКС, используются экспертами при получении оценок экономических и социальных последствий предполагаемых климатических изменений. Для этой цели применяются экономико-математические модели. Однако, в отличие от моделей климата, оценка адекватности которых проблем не вызывает, поскольку необходимые для этого ретроспективные климатические данные имеются в достаточном количестве, адекватность экономических моделей, являющихся, по сути, эмпирическими, оценить практически невозможно ввиду отсутствия необходимых исторических сведений о взаимосвязи изменения климата и экономических процессов. Необходимость изучения и прогнозирования социально-экономического развития общества и разработка концептуальных стратегий взаимодействия общества и природы в условиях изменяющегося с

беспрецедентной скоростью климата, обусловили создание так называемых моделей комплексной оценки (integrated assessment models) [13, 14], учитывающих в той или иной степени взаимозависимость климатических и экономических процессов. Примечательно, что в 2018 году Нобелевская премия по экономике была присуждена П. Ромеру и У. Нордхаусу «за интеграцию проблем изменения климата и технологических инноваций в долгосрочный макроэкономический анализ». В частности, Нордхаусом была разработана модель DICE [15], связывающая воедино климатические изменения и экономику, и введено понятие «социальная цена углерода», или «социальная цена выброса», что позволило ему определить экономический ущерб, обусловленный одной тонной CO<sub>2</sub>, эмитированной в атмосферу, и на этой основе рассчитать размер углеродного налога. Результаты, полученные с помощью моделей комплексной оценки, используются политиками для разработки мер адаптации к изменению климата, сводящихся, по сути, к уменьшению уязвимости природных и антропогенных систем к неблагоприятным последствиям климатических изменений. Таким образом, рассматривая проблему взаимодействия природы и человеческого общества и, в частности, климата и экономики, мы имеем дело с кибернетической системой, которая включает в себя в качестве управляющей подсистемы международные и национальные компетентные органы, наделенные соответствующими полномочиями и обладающие необходимыми материальными, техническими, технологическими и иными ресурсами, а в качестве управляемой подсистемы – взаимодействующие климатическую и глобальную, региональную и страновую экономические системы.

Важно подчеркнуть, что разработка и реализация адаптационных мер и стратегий, осуществляемых подсистемой управления кибернетической системы «климат-экономика», есть ни что иное, как *борьба со следствием, но не с причиной*. К тому же адаптация как приспособляемость антропогенных и природных систем к изменению климата имеет ограниченные возможности, поскольку очевидно, что существуют некоторые критические значения климатических параметров, выход за пределы которых вследствие глобального потепления сведет все адаптационные усилия к нулю, так как человек и природа могут существовать только в определенных (допустимых) условиях окружающей среды. Интересно, что если сегодня человечество полностью остановит выбросы ПГ в атмосферу, разогрев нашей планеты в течение нескольких десятилетий, вероятно, продолжится в силу огромной тепловой инерсии ЗКС. На наш взгляд, в качестве наиболее эффективной и в то же время радикальной адаптационной меры целесообразно рассматривать геоинжиниринг (климатический инжиниринг) [16, 17]. Ввиду объективных обстоятельств [18], оценка эф-

фективности и климатических последствий геоинженерных проектов может быть выполнена только на основе численного моделирования при заданных сценариях антропогенного увеличения концентраций атмосферных ПГ и сценариях геоинженерных воздействий на ЗКС. В настоящее время общепризнанными сценариями роста содержания ПГ в атмосфере являются RCP (Representative Concentration Pathways) [19], одобренные МГЭИК. В противоположность этому, общепризнанных сценариев геоинженерных воздействий существовать не может и, следовательно, те сценарии, которые используются в численном моделировании, несут в себе значительный элемент субъективизма. Поскольку цель геоинжиниринга состоит в управлении состоянием ЗКС с тем, чтобы обеспечить комфортные для существования человеческого общества и природы условия, задача целенаправленной модификации климатических условий рассматривается нами (в отличие от многочисленных ранее выполненных исследований) в рамках теории оптимального управления с математической формализацией целей геоинженерных воздействий и методов их достижения [18, 20-24]. В этой связи необходимо подчеркнуть, что еще в конце 1970-х годов одним из авторов настоящей работы была предложена единая методология планирования и реализации воздействий на окружающую природную среду на основе теории управления и сформулированы теоретические основы геофизической кибернетики как науки об управлении процессами в геофизической среде. Но по ряду причин фундаментальные положения геофизической кибернетики были опубликованы лишь в 1998 году [25].

Цель настоящей статьи – рассмотреть с кибернетических позиций проблему взаимодействия природы и общества в условиях современного изменения климата, беспрецедентного по своим масштабам и темпам, вызванного антропогенной деятельностью, обратив особое внимание на слабые стороны субъекта глобального управления; проанализировать основные причины неопределенностей оценок изменения климата и наносимого этими изменениями экономического ущерба; с помощью малопараметрических моделей ЗКС оценить влияние обратных связей в ней на изменчивость климата и проиллюстрировать приложение методов геофизической кибернетики к решению задач климатического инжиниринга.

**2. Агрегированная структура кибернетической системы «климат-экономика».** Основы универсальной методологии управления принципиально различными объектами природы и общества были, как известно, сформулированы Н. Винером [26, 27] – основоположником кибернетики, науки, объектом исследования которой являются все управляемые системы. Абстрактная кибернетическая

система обладает свойством целеустремленности и в очень агрегированном виде может быть представлена как совокупность двух взаимозависимых подсистем – управляющей подсистемы и объекта управления. Взаимодействие между ними обеспечивается посредством существующих в кибернетической системе обратных связей, по которым информация о состоянии объекта управления передается в управляющую подсистему. Агрегированная структура кибернетической системы «климат-экономика» показана на рисунке 1. В этой системе управляющая подсистема является сложной, имеющей иерархическую структуру, так как целенаправленно воздействовать на экономику и климат человеческое общество может не как целое, а через посредство одной или нескольких входящих в него подструктур. Поскольку изменение климата – глобальный феномен, влияющий на природу и человеческое общество в планетарном масштабе, на самом верхнем уровне иерархии управляющей системы находятся межправительственные организации (например, ООН и ее структурные подразделения – Всемирная метеорологическая организация и Программа ООН по окружающей среде), на втором сверху уровне – правительства отдельных стран, далее на соответствующих уровнях иерархии располагаются специализированные административные органы и технические службы, формируемые внутри общества для осуществления конкретных функций управления.

Объект управления структурно состоит из двух взаимодействующих подсистем – экономической и климатической, являющихся сложными системами с многочисленными обратными связями между собой и внутри себя. Математические модели, входящие в контур экономической системы, играют двоякую роль: с одной стороны, с их помощью оценивается суммарная антропогенная эмиссия ПГ в тоннах  $\text{CO}_2$ -эквивалента и на этой основе формируются сценарии изменения концентраций атмосферных ПГ, используемые в моделях динамики климата для расчета антропогенного радиационного форсинга; с другой стороны, посредством этих моделей выполняется анализ уязвимости мировой экономики и/или ее различных секторов, региональных экономик, экономик разных стран и отдельных субъектов экономической деятельности к изменению климата.

Расчет глобальных эмиссий ПГ – проблема чрезвычайно сложная, требующая совместных межправительственных усилий и кооперации исследовательских центров различных стран. Возможные сценарии изменения концентраций атмосферы ПГ, соответствующие различным «поведенческим» стратегиям человеческого общества, рассматриваются и утверждаются МГЭИК. В частности, при подготовке

последнего Пятого оценочного доклада, как уже отмечалось выше, МГЭИК утвердила сценарии RCP [19], которые являются результатом синтеза оценок концентраций ПГ, полученных для различных стран и регионов группами экспертов по поручению правительств соответствующих стран. Существуют также независимые группы экспертов (например, «The Climate Action Tracker»), которые осуществляют мониторинг эмиссий ПГ и отслеживают выполнение разными странами взятых на себя обязательств по контролю за выбросами ПГ.

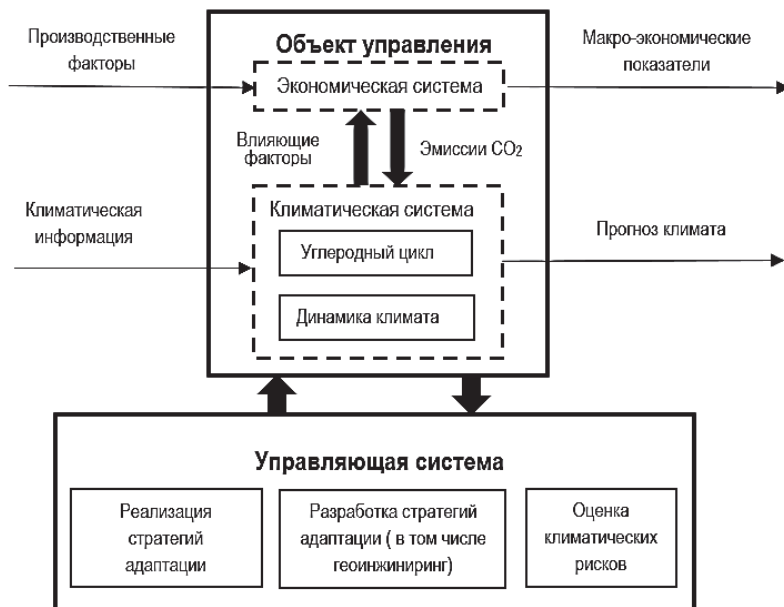


Рис. 1. Структура системы «климат-экономика»

Следующая группа моделей экономического блока предназначена для оценки уязвимости экономических систем к изменению климата. Оценка уязвимости предполагает обоснование для каждой системы ключевых показателей эффективности (КПЭ) (в англоязычной литературе – Key Performance Indicators) и построение математических моделей, уравнения которых описывают связи между КПЭ и климатическими переменными. Для мировой экономики в качестве КПЭ берется, как правило, валовый мировой продукт, для экономики отдельной страны – валовый внутренний продукт, для территориальной единицы – валовый региональный продукт, а для отдельного предприятия – валовая прибыль. Однако существующие экономические модели связывают КПЭ

только с макроэкономическими переменными, чего явно недостаточно для оценки влияния изменения климата на экономику. Таким образом, возникает необходимость в исследованиях, связанных с оценкой воздействия различных климатических переменных на эффективность функционирования экономических систем различного уровня. Формально данная процедура выглядит следующим образом. Предположим, нами исследуется влияние изменения климата на региональную экономику. Обозначим через  $Q$  валовый региональный продукт (ВРП), а через  $x = (x_1, \dots, x_n)$  – вектор переменных, влияющих на эффективность функционирования территориальной экономики, тогда  $Q = F(x_1, \dots, x_n)$ . Задача построения модели состоит в определении функции  $F$ . При исследовании экономических систем в качестве  $F$  обычно используются производственные функции, связывающие ВРП и факторы производства (капитал, затраты на труд, сырье, технологии, энергетические ресурсы и др.). В нашем случае к числу зависимых переменных добавляются климатические переменные или их производные, которые, по мнению экспертов, оказывают влияние на  $Q$ . Заметим, что в экономических моделях климатические переменные играют роль параметров. Существует некоторый набор стандартных производственных функций, используемых в экономическом анализе (функции Кобба – Дугласа, Леонтьева, CES, линейные, транслогарифмические и др.) [28]. Производственные функции являются чисто эмпирическими, поэтому к получаемым на их основе результатам следует подходить с большой осторожностью [29]. Влияние вариаций климатических параметров на ВРП оценивается с помощью абсолютных и относительных функций чувствительности [30]. Пусть  $x_n$  – некоторый климатический параметр, оказывающий влияние на ВРП  $Q$ . Абсолютная функция чувствительности (АФЧ)  $S_n$  определяется как частная производная от  $Q$  по параметру  $x_n$ :  $S_n = \partial Q / \partial x_n$ . Имея АФЧ и задаваясь вариацией параметра  $x_n$ , можно в первом приближении определить изменение ВРП, обусловленное отклонением климатического параметра  $x_n$  от его многолетней нормы  $x_n^{(0)}$ :  $\delta Q(x_n) \approx \delta x_n S_n$ . Здесь  $\delta x_n = x_n - x_n^{(0)}$  – малая вариация параметра  $x_n$ , обусловленная изменением климата. Вычисленная таким образом вариация  $\delta Q$  используется для оценки уязвимости экономической системы к изменению климата и, при необходимости, для оценки климатического риска. Поскольку модели экономических систем могут содержать несколько климатических параметров, для анализа параметрической чувствительности целесообразно применять однофакто-



рый подход, в рамках которого климатические параметры считаются независимыми друг от друга. Отметим, что в общем случае нахождение АФЧ выполняется с помощью уравнений чувствительности [30].

Климатические параметры, оказывающие влияние на эффективность функционирования экономических систем, как правило, неравнозначны по смыслу (т.е. они имеют различную размерность и отличаются друг от друга классом эквивалентности). Тот факт, что АФЧ  $S_{x_i}$  по величине превосходит АФЧ  $S_{x_j}$ , совсем не означает, что параметр  $x_i$  более значим, чем параметр  $x_j$ . Поэтому с помощью АФЧ не представляется возможным выполнить ранжирование параметров по степени их значимости и убрать из рассмотрения те параметры, влияние которых на  $Q$  мало. Для этой цели подходят относительные функции чувствительности (ОФЧ), характеризующие связь между относительными вариациями параметров и соответствующим относительным изменением ВРП. Для рассматриваемого выше случая ОФЧ  $S_n^R$  определяется следующим образом:  $S_n^R = \partial \ln Q / \partial \ln x_n$ .

Качество исследования чувствительности экономических систем и их уязвимости к изменению климата в значительной степени определяется точностью, достоверностью, репрезентативностью и полнотой как климатической, так и соответствующей экономической информации. Для стран с неразвитой и неустойчивой экономикой, где также имеет место относительно частое снижение национальной денежной единицы по отношению к твердым валютам, задача исследования чувствительности экономических систем к изменению климата является трудновыполнимой.

Сценарии эмиссий ПГ, сформированные на основе экономических моделей при различных «поведенческих» стратегиях общества относительно степени его вмешательства (или невмешательства) в изменение климата посредством реализации мер по сокращению выбросов ПГ, используются для расчета антропогенного радиационного форсинга и получения прогностических оценок изменения климата на десятилетия вперед. Основным инструментом, с помощью которого получают эти оценки, – чрезвычайно сложные глобальные модели климата, описывающие динамику общей циркуляции атмосферы и океана и их взаимодействие с другими компонентами ЗКС. Изменения климата в отдельных частях земного шара уточняются с помощью региональных климатических моделей.

Современные климатические модели, разработанные в научных центрах экономически развитых стран (включая Россию), вполне реалистично воспроизводят глобальный климат и его региональные

особенности. При этом, однако, имеют место довольно значительные межмодельные расхождения проекций будущего климата, полученных для различных эмиссионных сценариев (табл. 1 [4]), что обусловлено неодинаковой реакцией различных моделей на один и тот же антропогенный форсинг. Иными словами, каждая климатическая модель обладает уникальной чувствительностью к вариациям радиационного форсинга.

Таблица 1. Увеличение СПТВ к 2100 году относительно ~1850 года [4]

Сценарий	Концентрация CO <sub>2</sub> , ppm	Диапазон СПТВ, °C	Среднее значение СПТВ, °C
RCP2.6	475	0,3 – 1,7	1,0
RCP4.5	630	1,1 – 2,6	1,8
RCP6.0	800	1,4 – 3,1	2,2
RCP8.5	1313	2,6 – 4,8	3,7

В исследованиях климата для оценки реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие в качестве одной из основных характеристик чувствительности используется так называемая равновесная чувствительность, определяемая как ожидаемое изменение СПТВ  $\Delta T_{2x}^{eq}$  климатической системы, находящейся в стационарном состоянии, которое обусловлено удвоением концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> [4]:  $\Delta T_{2x}^{eq} = \alpha \Delta F_{2x}$ , где  $\alpha$  – коэффициент климатической чувствительности,  $\Delta F_{2x} \approx 3,7$  Вт/м<sup>2</sup> – радиационный форсинг, вызванный удвоенной концентрацией атмосферного CO<sub>2</sub> [4]. Данное выражение получено в рамках теории линейных стационарных систем, исходя из энергетического баланса ЗКС. Значения коэффициента  $\alpha$ , полученные для различных моделей климата, «с высокой степенью достоверности» находятся в интервале 0,41 – 1,22 °C/(Вт/м<sup>2</sup>) [4]. Достаточно широкий диапазон изменения параметра  $\alpha$ , а значит, и межмодельные расхождения в реакции ЗКС на внешнее радиационное воздействие обусловлены главным образом спецификой каждой модели в отношении воспроизведения ею обратных связей в ЗКС [4, 31, 32], поскольку параметр, обратный коэффициенту чувствительности  $\lambda = 1/\alpha = \Delta F_{2x}/\Delta T_{2x}^{eq}$  и имеющий размерность (Вт/м<sup>2</sup>)/°C, характеризует обратные связи в ЗКС [33]. Неизученность многочисленных обратных связей в ЗКС, нелинейность и инерционность протекающих в ней процессов, наличие точек бифуркации обуславливают межмодельные отличия в воспроизводимой моделями эволюции ЗКС, а значит, и неопределенность полученных оценок изменения климата.

Связующим звеном между субъектом и объектом управления кибернетической системы «климат-экономика», являются решения,

формируемые субъектом управления, посредством которых он воздействует на объект управления. От качества решений, принимаемых субъектом управления, в значительной степени зависит функционирование всей системы. В нашем случае предотвратить фатальные для общества последствия изменения климата возможно лишь при условии, что управляющая система адекватно реагирует на изменяющиеся условия внешней среды (например, вариации солнечной активности, усиление вулканической деятельности) и сигналы (социального, экономического, политического характера), исходящие изнутри. В настоящее время в мировом масштабе роль субъекта управления самого верхнего уровня играет МГЭИК. В последнее время многие ведущие зарубежные ученые – эксперты в области наук о Земле (J. Hansen, K. Anderson, M. Mann, M. Oppenheimer, N. Oreskes, S. Rahmstorf, E. Rignot, H. Schellnhuber, K. Trenberth и др.), подвергают деятельность МГЭИК сильной критике за неадекватный стиль работы и излишнюю политизацию принимаемых решений. По их мнению, МГЭИК делает все возможное для того, чтобы значительно приуменьшить возможные негативные для человечества последствия глобального потепления с тем, чтобы «не нервировать» общественность. Некоторые ученые-климатологи (например, R. Knutti) вообще склоняются к мысли, что в вопросе изменения глобального климата точка невозврата уже пройдена, объясняя это тем, что в силу нелинейности ЗКС и многообразия обратных связей в ней наблюдаемые в настоящее время климатические тренды могут быть одномоментно нарушены. В результате возможны природные события, катастрофические по своим масштабам и последствиям. В вероятностном смысле такие события характеризуются распределениями с «тяжелыми хвостами», для которых вероятность отклонения от средних значений значительно больше, чем при нормальном распределении, а оценки средних выборочных значений являются неустойчивыми и малорепрезентативными. Поскольку МГЭИК отдает предпочтение консервативным прогнозам и «научной сдержанности», принимаемые ею решения могут быть не совсем адекватными. Поэтому слепое следование методикам и рекомендациям МГЭИК – сомнительная стратегия, отвергающая творческий подход к проблеме.

В целом в настоящее время проблема взаимодействия общества и природы, и в частности проблема глобального управления кибернетической системой «климат-экономика» в условиях современного изменения климата является неэффективной по ряду причин и, прежде всего, потому, что международная институциональная система не способна обеспечить необходимого качества глобального управления и сформировать управляющие органы, наделенные реальными власт-

ными полномочиями. Национальные правительства, имеющие такие полномочия, даже в пределах своих возможностей не реализуют их в полной мере и очень часто действуют рассогласовано. Следовательно, вопрос о построении подсистемы управления кибернетической системы «климат-экономика» остается открытым.

**3. Исследование влияния изменения климата на экономические системы.** Для оценки влияния изменения климата на мировую экономику и экономику отдельных крупных регионов широкое применение получили упомянутые выше модели комплексной оценки. Эти модели являются по своей сути концептуальными, связывающими воедино социально-экономическое развитие общества и природу с тем, чтобы иметь возможность оценивать различные сценарии экологической политики в контексте изменения климата. Модели комплексной оценки делятся на две большие группы. К первой группе относятся процессо-ориентированные модели, задача которых сводится к получению количественных оценок относительно будущего развития общества при различных сценариях экологической политики. Модели второй группы служат для оценки затрат и выгод, связанных с реализацией проектов по смягчению последствий изменения климата. В целом модели комплексной оценки не дают прогнозов на будущее, а скорее оценивают возможные сценарии развития общества. В последние годы модели данного класса подвергаются серьезной критике в различных аспектах и, в частности, в плане необоснованности и недостаточной прозрачности исходных положений и базовых принципов, неадекватности описания реальной политики и (инновационных и не только) процессов и так далее [34]. Один из наиболее признанных экспертов в исследовании системы «общество-климат» Р. Пиндайк вообще заявляет, что модели комплексной оценки не имеют никакой ценности, поскольку с их помощью невозможно оценить политические альтернативы в области изменения климата и определить социальную стоимость углеродных единиц [35]. Им также отмечается, что фактические данные (в основном экономические), необходимые для оценки ущерба вследствие изменения климата, практически отсутствуют.

На наш взгляд, помимо получения оценок влияния различных политических стратегий контроля эмиссий ПГ на мировую экономику, получаемых с помощью моделей комплексной оценки, более разумно перенести внимание на анализ климатических рисков и исследование воздействий изменения климата на конкретные социально-экономические системы вплоть до отдельных субъектов экономической деятельности. К сожалению, исследования подобного рода чрезвычайно малочисленны. Примером более-менее детального рассмотрения проблемы влияния климатических факторов на экономику регионов служит работа [36], в кото-

рой выполнена оценка чувствительности 11 секторов экономик всех территориальных единиц (штатов) США к вариациям четырех параметров, описывающих температурно-влажностный режим ЗКС. Температура воздуха характеризуется градусо-днями отопительного сезона (heating degree days) и градусо-днями охлаждающего сезона (cooling degree days), а для характеристики осадков используются их общее количество и стандартное отклонение. Анализ влияния изменчивости этих параметров на каждый сектор региональной экономики осуществляется с помощью транслогарифмической производственной функции вида:

$$\ln Q_{it} = \beta_0 + rt + \sum_{n=1}^N \beta_n \ln x_{tin} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \beta_{nm} \ln x_{mi} \ln x_{mi} + \varepsilon_{it}, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $i$  – порядковый номер территориальной единицы;  $r$  – ставка дисконтирования;  $\beta_0, \beta_n, \beta_{nm}$  ( $n, m = 1, \dots, N$ ) – неизвестные коэффициенты, подлежащие определению;  $N$  – размерность вектора входных переменных, в число которых входят капитал (в денежном выражении), трудовые затраты (в часах), энергетические затраты (в Британских тепловых единицах), а также четыре упомянутых выше климатических параметра (т.е.  $N=7$ );  $\varepsilon_{it}$  – ошибка аппроксимации. Неизвестные коэффициенты выражения (1) определялись на основе ретроспективной (за 24 года) климатической и экономической информации.

Результаты анализа показали, что все 11 секторов экономики обладают статистически значимой чувствительностью к изменчивости (вариациям) рассматриваемых климатических параметров, а суммарный валовый внутренний продукт всех 11 секторов экономики США изменялся на ~3,4% (485 млрд долларов США в ценах 2008 года) под влиянием флуктуаций (с периодом 24 часа) климатических параметров.

Следует также обратить внимание на междисциплинарное комплексное исследование, предпринятое в рамках проекта Европейского Союза «Изменение климата, экономика и общество в Арктике» (ACCESS) [37], в котором была выполнена оценка физического воздействия изменения глобального климата на Арктику и обусловленных этими изменениями социально-экономических последствий (до 2050 года) с акцентом на ключевые виды экономической деятельности Арктического региона: судоходство, туризм, производство морепродуктов и добыча природных ресурсов.

В нашей стране проблеме комплексных междисциплинарных исследований по оценке влияния изменения климата на экономические системы различного уровня уделяется крайне мало внимания, хотя в этом направлении имеются некоторые разработки (см., например, [38-

40]). В частности, нами разработана математическая модель, предназначенная для оценки влияния повышения уровня моря и сопутствующих изменений в ЗКС, обусловленных ростом концентрации атмосферных ПГ, на прибрежные зоны морей и океанов (табл. 2). Изменение уровня моря под влиянием глобального потепления рассматривается нами как случайный процесс, описываемый диффузионным стохастическим уравнением:

$$h_t = \gamma h_t dt + \sigma h_t dW_t, \quad (2)$$

где  $h_t$  – уровень моря в момент времени  $t$  относительно некоторого начального (базового) уровня  $h_0$  в интересующей нас географической точке;  $\gamma$  и  $\sigma$  – параметры, описывающие тренд и волатильность (изменчивость)  $h$ ;  $dW_t$  – инкремент Винеровского процесса.

Таким образом, временное изменение  $h$  обусловлено детерминистическим фактором (параметр  $\gamma$ ), описывающим тенденцию среднего по ансамблю реализаций значения уровня моря  $\langle h_t \rangle$ , и случайными факторами, агрегировано описываемыми вторым слагаемым уравнения (2). Выражения для математического ожидания  $M[h_t]$ , дисперсии  $D[h_t]$  и медианы  $\mu[h_t]$  имеют вид:

$$D_M(t) \equiv \varphi_1 h_t + \dots + \varphi_n h_t^n, \quad D[h_t] \equiv \langle h_t^2 \rangle - \langle h_t \rangle^2, \quad \mu[h_t] = h_0 e^{(\gamma - \sigma^2)t}. \quad (3)$$

Калибровка модели, выполненная с помощью данных МГЭИК, строилась таким образом, чтобы параметры модели представляли собой 95% перцентили. Для Санкт-Петербурга при сценарии RCP8.5 были получены следующие значения параметров модели (2):  $\gamma = 0,7517 \times 10^{-2}$  год<sup>-1</sup>,  $\sigma = 2,7952 \times 10^{-2}$  год<sup>-2</sup>. Расчитанное методом Монте-Карло среднее значение  $h$  в 2100 году относительно 2007 года составило  $\sim 0,501$  м. Это значение использовалось для расчета меры риска и экономических потерь. В качестве стоимостной меры риска взят так называемый «Value at Risk» (*VaR*), характеризующий величину убытков, которая с заданной доверительной вероятностью  $p$  (например, 95%) не будет превышена. Для оценки среднего ущерба от 5% наиболее сильных наводнений применяется «прогнозируемый дефицит пятипроцентного уровня» *ES*(5%). Экономический ущерб вследствие увеличения уровня моря оценивается с помощью функции потерь, представляющей собой регрессионную зависимость между  $h$  и экономическими потерями, выраженными в денежных единицах:

$$D_M(t) \equiv \varphi_1 h_t + \dots + \varphi_n h_t^n, \quad (4)$$

где  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$  – коэффициенты, подлежащие определению. В задачах оценки экономических последствий наводнений в прибрежных зонах обычно используется следующая формула для функции потерь:

$$D_M(t) \equiv F_1(h_t) + F_2(t). \quad (5)$$

Первое слагаемое в этом выражении характеризует влияние повышения уровня моря на региональную экономику, а второе слагаемое описывает социально-экономические последствия изменения климата, какими бы они были при отсутствии повышения уровня моря. В таблице 2 перечислены основные негативные последствия повышения уровня моря для прибрежных зон [40].

Таблица 2. Влияние повышения уровня моря на прибрежные зоны

Фактор	Прямой эффект	Вторичный эффект
Рост уровня моря	Усиление эрозии береговой черты. Увеличение затопления низин и заболоченных земель. Увеличение риска наводнений и ущерба, обусловленного штормами. Увеличение засоленности поверхностных и грунтовых вод. Миграция видов по направлению к полюсу	Влияние на инфраструктуру и экономическую деятельность. Переезд уязвимых групп населения
Изменение волновой активности	Усиление волнового дренажа, эрозии и земельных наносов. Увеличение повторяемости больших волн	Дальнейшая эрозия. Увеличение ущерба от штормов
Изменение интенсивности и частоты штормов и циклонов	Изменение повторяемости и интенсивности затопления прибрежных низин. Изменение качества питьевой воды Изменение количества выносимых реками осадочных пород. Быстрый подъем побережья.	Последствия прибрежной эрозии и наводнений

Используя данные об инфраструктуре Санкт-Петербурга и результаты прогноза социально-экономического развития города до 2100 года [41, 42], следующие значения  $VaR(95\%)$ ,  $ES(5\%)$  и средних годовых потерь (в ценах 2007 г.) были нами получены для 2050/2100 годов: 2,3/8,1, 3,0/10,0 и 0,6/3,3 млрд долларов США (потери оце-

нены в долларах США, поскольку входная информация заимствована из зарубежных источников). Адаптационные меры борьбы с последствиями роста уровня моря включают строительство дамб, передислокацию производственных мощностей вглубь континентальной части, разработку планов восстановления береговой черты, построение системы мониторинга за гидрологической обстановкой, прекращение строительства вблизи береговой линии и другое. Стоимость возможных адаптационных мер сравнивается с предполагаемыми потерями, что, по сути, представляет собой оценку экономических последствий глобального потепления в терминах затрат и выгод.

В целом результаты различных исследований, связанных с оценкой влияния изменения климата на экономику, характеризуются существенным разнообразием и зачастую диаметрально противоположны, что обусловлено недостаточной адекватностью используемых экономико-математических моделей, малым объемом (или полным отсутствием) необходимых для анализа ретроспективных экономических данных, субъективизмом в выборе функций потерь и многими другими факторами.

**4. Обратные связи в климатической системе и их влияние на изменчивость климата.** Оценка экономических последствий изменения климата невозможна без наличия проекционных оценок будущего климата. Основным инструментом для получения этих оценок – математические модели ЗКС (в последнее время модели земной системы), реализуемые численно на высокопроизводительных компьютерах. В процессе выполнения численных экспериментов исследователи используют более-менее правдоподобные сценарии антропогенного воздействия на ЗКС (обычно RCP), а получаемые оценки изменения климата называют проекциями, а не прогнозом. Несмотря на то что в целом имеет место высокая степень согласия между проекциями климата, полученными в рамках Проекта по взаимному сравнению совместных моделей (CMIP5) [43], ряд конкретных характеристик (например, равновесная чувствительность, климатические тренды и изменчивость) у рассматриваемого ансамбля моделей существенно варьируются [4]. В качестве примера в таблице 1 показаны интервалы вероятных значений СПТВ в 2100 году, рассчитанные по ансамблю моделей CMIP5. Однако современный климат характеризуется не только положительным трендом, обусловленным ростом содержания в атмосфере ПГ, но и колебаниями, охватывающими широкий диапазон частот и масштабов [4]. Климатические аномалии (колебания относительно основного тренда), характеризующие изменчивость климата, также имеют очень существенные межмодельные расхождения. К примеру, для декадных аномалий глобальных и полусферных темпера-



тур межмодельные отличия стандартного отклонения достигают четырехкратной величины [44]. Причины столь значительного разброса оценок климатической изменчивости не совсем ясны, но при этом признается, что обратные связи в ЗКС играют существенную роль как в процессах, формирующих климатические тренды, так и в процессах, являющихся причиной изменчивости глобального климата [31, 32, 44].

По отношению к внешним радиационным воздействиям обратные связи в ЗКС играют роль своеобразных регуляторных механизмов, способствующих либо усилению (если обратные связи положительны), либо уменьшению (если обратные связи отрицательны) эффекта этих воздействий. Таким образом, с позиций кибернетики, ЗКС, на которую оказывают влияние разнообразные внешние факторы, в первую очередь солнечная радиация, является в сущности замкнутой системой управления, что создает мощные мотивационные предпосылки для разработки физически обоснованных методов целенаправленного воздействия на нее, то есть для оптимального управления ЗКС. Данные наблюдений за глобальным климатом и результаты моделирования говорят о том, что интегрально обратные связи в ЗКС усиливают ее реакцию на радиационные воздействия [4]. Величина радиационного форсинга и обратные связи являются определяющими факторами, обуславливающими темпы изменения климата и основные особенности этого изменения.

Наличие в атмосфере водяного пара ( $H_2O$ ), обладающего наиболее сильными парниковыми свойствами по сравнению с другими ПГ, является причиной основной положительной обратной связи в ЗКС: вследствие глобального потепления количество  $H_2O$  в атмосфере увеличивается, что, в свою очередь, способствует дальнейшему потеплению. Используя уравнение Клаузиуса – Клапейрона, можно показать, что рост температуры воздуха на  $1^\circ C$  приводит к увеличению содержания  $H_2O$  в атмосфере примерно на 7% [45]. Следовательно, атмосферный  $H_2O$  усиливает незначительный эффект потепления вследствие роста содержания  $CO_2$ .

Основная отрицательная обратная связь (Планковский механизм обратной связи) вытекает из закона Стефана – Больцмана, согласно которому величина длинноволнового (инфракрасного) уходящего в космос излучения Земли пропорциональна четвертой степени температуры земной поверхности. Отсюда следует, что антропогенное повышение температуры подстилающей поверхности, приводящее к росту величины планетарного уходящего длинноволнового излучения, способствует уменьшению температуры.

Обратная связь углеродного цикла с климатом и облачно-радиационные обратные связи, как наименее изученные, остаются

крупнейшими источниками неопределенности проекций будущего климата, получаемых с помощью различных моделей. Исследование обратных связей в ЗКС и оценка их влияния на происходящие климатические процессы представляет большой научный и прикладной интерес [46]. Научный интерес к проблеме связан с углублением наших знаний о ЗКС и прогнозированием изменения климата вследствие естественных и антропогенных причин, а прикладной интерес обусловлен необходимостью разработки мер адаптации к изменению климата и, в частности, целесообразностью создания оптимальных систем управления ЗКС для противодействия глобальному потеплению.

Проблема влияния неопределенностей обратных связей в ЗКС на изменчивость климата вследствие случайных флуктуаций радиационного форсинга может быть рассмотрена в рамках теории чувствительности систем управления [30]. В предположении, что ЗКС является разомкнутой кибернетической системой, в которой присутствует только Планковский механизм обратной связи, обеспечивающий рост величины длинноволнового уходящего излучения при повышении температуры подстилающей поверхности, параметр климатической обратной связи, называемый в дальнейшем базовым, определяется следующим образом [33]:

$$\lambda_0 = -4\varepsilon\sigma T_0^3 \approx -3,4 \text{ (Вт/м}^2\text{)/К,}$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучательной способности подстилающей поверхности, учитывающий отличие Земли от абсолютно черного тела и поглощение длинноволновой радиации водяным паром, облачностью, парниковыми газами и аэрозолям,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{ К}^4\text{)}$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $T_0 \approx 288 \text{ К}$  – СПТВ.

В ответ на удвоение содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере соответствующий базовый коэффициент равновесной климатической чувствительности  $\alpha_0$  составляет  $\sim 0,3 \text{ К/(Вт/м}^2\text{)}$ , а изменение равновесной СПТВ –  $\Delta T_0 \approx 1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Как уже отмечалось, Планковский механизм обеспечивает отрицательную обратную связь в ЗКС: изменение уходящего длинноволнового излучения приводит к такому изменению  $T_0$ , которое противодействует первоначальному ее изменению, благодаря которому произошла «разбалансировка» ЗКС.

Наряду с параметром обратной связи  $\lambda$  целесообразно, по аналогии с автоматикой и теорией систем управления, рассматривать безразмерный коэффициент обратной связи  $f$ , который в замкнутой системе пропорционален части «выходного сигнала» ЗКС, поступающей

обратно на ее «вход», связанный с параметром  $\lambda$  соотношением  $f = (\lambda_0 - \lambda) / \lambda_0$  [33]. Нетрудно заметить, что для разомкнутой климатической системы  $f = 0$ . С помощью введенного коэффициента  $f$  выражение для равновесной чувствительности климата в замкнутой системе записывается следующим образом:  $\Delta T_{2x}^{eq} = G \Delta T_0$ , где  $G = 1 / (1 - f)$  – коэффициент усиления. Для реальной климатической системы коэффициент обратной связи находится в интервале  $0 < f < 1$  [33] и, следовательно, коэффициент усиления  $G > 1$ . Поэтому реакция замкнутой системы на внешнее воздействие превосходит реакцию разомкнутой системы. Иными словами, суммарный эффект обратных связей в ЗКС является положительным.

Анализ уравнения в вариациях  $\delta(\Delta T_{2x}^{eq}) = G^2 \Delta T_0 \delta f$ , полученного из выражения для равновесной чувствительности климата, показывает, что между неопределенностью реакции ЗКС на радиационное воздействие и обратными связями имеет место нелинейная (квадратичная) зависимость [33]. Данное обстоятельство является одной из основных причин того, что получаемые с помощью климатических моделей проекции климата описываются не конкретными значениями переменных состояния, а диапазоном их возможных значений, то есть имеют вероятностную трактовку. Исходя из этого влияние различных факторов на изменчивость климата целесообразно рассматривать в рамках динамико-стохастического подхода к моделированию ЗКС. Важным моментом при использовании данного подхода является параметризация радиационного форсинга как случайного процесса. В климатических исследованиях случайный радиационный форсинг параметризуется, как правило, «по Хассельману» [47], то есть представляется в виде аддитивного гауссова дельта-коррелированного случайного процесса. Как показали исследования [48], такой подход к описанию случайных возмущений, действующих на ЗКС, является вполне обоснованным даже при использовании сложных климатических моделей. Для исследования обратных связей и их влияния на изменчивость климата нами применяется достаточно простая малопараметрическая модель ЗКС – двухблочная (двухслойная) энергобалансовая модель (ЭБМ) [49], описывающая эволюцию атмосферы и верхнего перемешанного слоя океана (верхний слой) и глубинных слоев океана (нижний слой):

$$C(dT/dt) = -\lambda T - \gamma(T - T_D) + F_s(t), \quad C_D(dT_D/dt) = \gamma(T - T_D). \quad (6)$$

Здесь  $T$  и  $T_D$  – глобально-осредненные аномалии температуры, описывающие состояние верхнего и нижнего слоев соответственно, а  $C$  и  $C_D$  – эффективные теплоемкости этих слоев;  $\gamma$  – параметр, характеризующий поглощение тепла глубинным океаном;  $F_s(t)$  – случайный радиационный форсинг, представляющий собой аддитивный белый гауссовский шум с нулевым средним  $\langle F_s(t) \rangle = 0$  и корреляционной функцией  $\langle F_s(t)F_s(t+\tau) \rangle = 2D_s\delta(\tau)$ , где  $\delta$  – дельта-функция. Параметр  $D_s$  определяется дисперсией случайного процесса  $\sigma_s^2$  и временем его корреляции  $\tau_s$ :  $D_s = \sigma_s^2\tau_s$ . Для удобства введем новую переменную  $q_s^2 = 2D_s$ . Значения параметров, используемые в расчетах, полученные на основе калибровки модели по данным СМIP5 [49]:  $C=7,3$  (Вт год)/(м<sup>2</sup> К<sup>1</sup>);  $C_D=105,5$  (Вт год)/(м<sup>2</sup> К<sup>1</sup>);  $\lambda=1,13$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>1</sup>);  $\gamma=0,73$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>1</sup>). Параметр  $q_s$  рассчитывался на основе асимптотического выражения  $\tilde{\sigma}_s^2 \approx 2\sigma_s^2\tau_s/\tilde{\tau}_s$  [50-52], из которого следует, что  $q_s^2 = \tilde{\sigma}_s^2\tilde{\tau}_s$ , где  $\tilde{\sigma}_s^2$  – величина дисперсии радиационного форсинга, сглаженная по периоду  $\tilde{\tau}_s$ . Для периода сглаживания  $\tilde{\tau}_s=1$  год стандартное отклонение  $\tilde{\sigma}_s$  составляет  $\sim 0,26$  Вт/м<sup>2</sup> [31, 32]. Это значение используется в вычислениях, поскольку в модели в качестве единицы меры времени принят год. Детерминированный радиационный форсинг в рассмотрение не принимается, так как в стохастической модели он не влияет на климатическую изменчивость. В асимптотическом приближении  $\gamma \rightarrow 0$  двухслойная модель (8) вырождается в обычную однобоксовую ЭБМ нулевой размерности [33], которая также используется нами в анализе обратных связей в ЗКС:

$$C(dT/dt) = -\lambda T + F_s(t). \quad (7)$$

За меру изменчивости климата принимается дисперсия СПТВ:  $\langle \delta T^2 \rangle \equiv \sigma_T^2 = \langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2$ , где  $\delta T = T - \langle T \rangle$ . Аналитические выражения для дисперсий  $\sigma_{1,T}^2$  и  $\sigma_{2,T}^2$ , полученные для одно- и двухслойной ЭБМ посредством преобразования соответствующих уравнений Фоккера – Планка, имеют вид [31, 32]:

$$\sigma_{1,T}^2 = \frac{q_s^2}{2\lambda C}, \quad \sigma_{2,T}^2 = \sigma_{1,T}^2 \frac{\gamma C + \lambda C_D}{\gamma C + (\lambda + \gamma) C_D}. \quad (8)$$

Дифференцирование уравнений (8) по коэффициенту  $f$  позволяет получить АФЧ, характеризующие влияние обратных связей в ЗКС на изменчивость СПТВ в рамках одно- и двухслойной ЭБМ:

$$S_{1,f} = \frac{q_s^2 \lambda_0}{2\lambda^2 C}, \quad S_{2,f} = S_{1,f} \frac{(\gamma C + \lambda C_D)^2 + \gamma^2 C C_D}{[(\gamma + \lambda)C_D + \gamma C]^2}. \quad (9)$$

Соответствующие ОФЧ определяются выражениями

$$S_{1,f}^R = \frac{f}{1-f}, \quad S_{2,f}^R = S_{1,f}^R \frac{(\gamma C + \lambda C_D)^2 + \gamma^2 C C_D}{(\gamma + \lambda)C_D + \gamma C}. \quad (10)$$

Полезные сведения о влиянии обратных связей на изменчивость климата могут быть получены из анализа спектральной плотности мощности (СПМ), характеризующей распределение дисперсий СПТВ по частотам спектра. Для того чтобы получить выражения для СПМ, воспользуемся теоремой о свертке, из которой следует, что если случайный сигнал, имеющий СПМ  $S_s(\omega)$ , где  $\omega$  – циклическая частота, преобразуется линейной стационарной системой, которая имеет в частотной области Фурье-образ импульсной переходной функции  $H(\omega)$ , то тогда СПМ выходного сигнала определяется формулой  $S_{TT}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_s(\omega)$ . Поскольку корреляционная функция радиационного форсинга, рассматриваемого в данной работе как дельта-коррелированный случайный процесс, задана, то из теоремы Винера – Хинчина следует, что СПМ входного сигнала, каковым является радиационный форсинг, имеет вид:  $S_s(\omega) = \sigma_s^2 \tau_s / \pi$ . Для одно- и двухслойной ЭБМ Фурье-образы переходной характеристики могут быть легко получены с помощью Фурье-преобразования уравнений соответствующей модели:

$$H_1(\omega) = (i\omega C + \lambda)^{-1}, \quad H_2(\omega) = \frac{\gamma + i\omega C_D}{C C_D [( \omega_0^2 - \omega^2 ) + i\omega 2\beta]}, \quad (11)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{\lambda\gamma/CC_D}$  и  $\beta = [\gamma(C + C_D) + \lambda C_D]/2CC_D$  – собственная частота и коэффициент затухания колебаний, описываемых системой (8). Тогда СПМ выходного сигнала (флуктуаций СПТВ) для одно- и двухслойной ЭБМ запишутся следующим образом:

$$S_{1,TT}(\omega) = \frac{q_s^2/C^2}{\pi[(\lambda/C)^2 + \omega^2]},$$

$$S_{2,TT}(\omega) = \frac{q_s^2(\gamma^2 + \omega^2 C_D^2)}{\pi C^2 C_D^2 \left[ (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \beta^2 \right]}.$$
(12)

Функции чувствительности (АФЧ и ОФЧ), характеризующие влияние малых вариаций коэффициента  $f$  на СПМ однослойной ЭБМ определяются следующими соотношениями:

$$S_{1,TT,\lambda}(\omega) = \frac{\partial S_{1,T}}{\partial \lambda} = -\frac{2\lambda q_s^2}{\pi(\lambda^2 + \omega^2 C^2)^2}, \quad S_{1,TT,\lambda}^R(\omega) = -\frac{2\lambda^2}{\lambda^2 + \omega^2 C^2}.$$
(13)

Соответствующие функции чувствительности для двухслойной модели не выписываем ввиду их чрезмерной громоздкости.

Рассматриваемые в данной работе малопараметрические модели ЗКС позволяют исследовать изменчивость климата на различных масштабах времени и оценивать влияние обратных связей на климатические колебания. Временной масштаб флуктуаций СПТВ, возникающих под воздействием внешнего случайного радиационного форсинга, определяется эффективной теплоемкостью атмосферы и верхнего слоя океана, то есть параметром  $C$  [32]. По данным CMIP5, для моделирования годовой изменчивости климата значение параметра  $C$  находится в интервале от 4,7 до 8,6 (Вт год)/(м<sup>2</sup> К<sup>1</sup>) при среднем межмодельном значении 7,3 (Вт год)/(м<sup>2</sup> К<sup>1</sup>) [49]. Для декадной и междекадной изменчивости в качестве характерных значений можно принять 20 и 30 (Вт год)/(м<sup>2</sup> К<sup>1</sup>), соответственно.

На рисунке 2 в левом окне представлена зависимость дисперсии СПТВ  $\sigma_{2,T}^2$  (К<sup>2</sup>) от коэффициента обратной связи  $f$ , рассчитанная для годового (1), декадного (2) и междекадного (3) временных масштабов, а в правом окне – спектральная плотность мощности  $S_{1,TT}$  (К<sup>2</sup>год) флуктуаций СПТВ, вычисленная при различных значениях коэффициента  $f$ . Как показывает рисунок 2, изменчивость СПТВ тем больше, чем сильнее обратные связи в ЗКС и чем меньше временной масштаб флуктуаций. Из анализа выражений для СПМ (12) следует, что в климатической системе при фиксированном значении параметра  $C$  (при заданном временном масштабе изменчивости климата) имеют место два колебатель-

ных режима. В высокочастотной области ( $\omega \gg \lambda/C$ ) спектр пропорционален  $\omega^{-2}$  и, следовательно, мало зависит от параметра обратной связи  $\lambda$  (или  $f$ ). В то же время в области низких частот ( $\omega \ll \lambda/C$ ) спектр определяется обратными связями и не зависит от частоты колебаний. Переход от одного режима к другому происходит при частоте  $\nu^* = \lambda/C$  (год<sup>-1</sup>). Рассмотренный качественный анализ СПМ согласуется с результатами вычислений, представленными на рисунке 2.

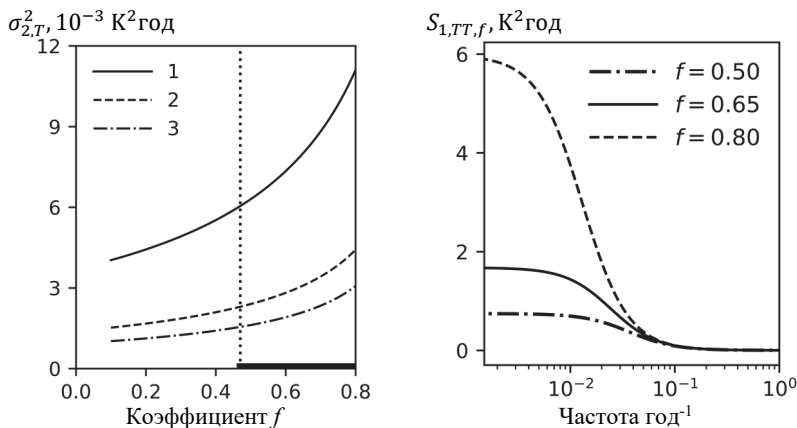


Рис. 2. Дисперсия и спектральная плотность мощности флуктуаций СПТВ при различных значениях коэффициента обратной связи  $f$  для годового (1), декадного (2) и междукадного (3) временных масштабов. В левом окне область значений коэффициента  $f$  по данным СМIP5 выделена жирной линией

Абсолютные и относительные функции чувствительности дисперсии СПТВ к коэффициенту обратной связи  $f$ , рассчитанные для годового (1), декадного (2) и междукадного (3) временных масштабов, показаны на рисунке 3. По мере увеличения коэффициента  $f$  чувствительность дисперсии СПТВ к вариациям этого параметра усиливается, при этом чем меньше временной масштаб климатической изменчивости, тем сильнее чувствительность дисперсии  $\sigma_{2,T}^2$  к коэффициенту  $f$ . Графики соответствующих АФЧ, построенные для различных временных масштабов климатической изменчивости как функции коэффициента  $f$  показаны в левом окне рисунка 3. В противоположность этому, влияние относительных вариаций коэффициента  $f$  растет с увеличением временного масштаба флуктуаций СПТВ.

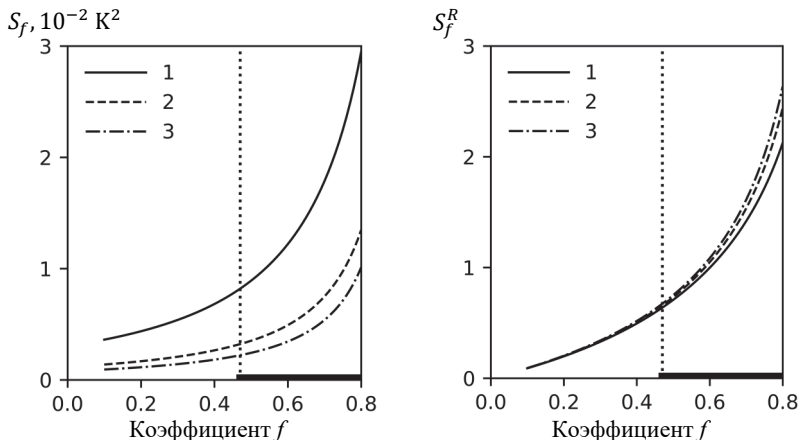


Рис. 3. Абсолютные и относительные функции чувствительности для годового (1), декадного (2) и междекадного (3) временных масштабов

Чувствительность спектров колебаний СПТВ к обратным связям в ЗКС иллюстрирует рисунок 4. На этом рисунке представлены функции чувствительности СПМ (в левом окне – абсолютные, а в правом – относительные) к коэффициенту обратной связи  $f$ , рассчитанные с помощью однослойной модели. Представленные на этих рисунках графики функций чувствительности в очередной раз указывают на увеличение чувствительности спектра по мере его сдвига в сторону низкочастотного диапазона.

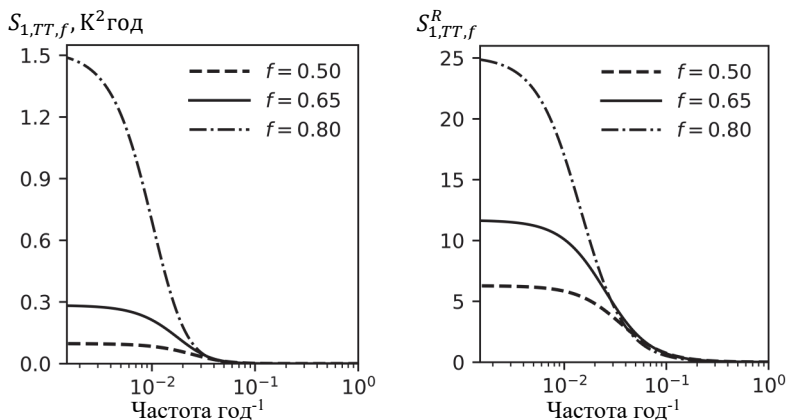


Рис. 4. Абсолютные и относительные функции чувствительности спектральной плотности в коэффициенту  $f$  для годового (1), декадного (2) и междекадного (3) временных масштабов



Неопределенность обратных связей в ЗКС, присущая современным моделям климата, является серьезным источником получаемых на их основе неопределенностей проекций будущего климата нашей планеты. Рассмотренные вкратце результаты, полученные с использованием малопараметрических стохастических моделей климата, иллюстрируют существенное влияние обратных связей в ЗКС на дисперсию флуктуаций СПТВ различных временных масштабов (т.е. на годовую, декадную и междекадную климатическую изменчивость) и спектр колебаний СПТВ.

Сопоставление результатов, полученных на основе однослойной и двухслойной ЭБМ, позволяет сделать вывод о том, что учет поглощения тепла глубинными слоями океана уменьшает амплитуду аномалий СПТВ, приближая их к реально наблюдаемым. Таким образом, двухслойная модель, в отличие от однослойной модели, может служить не только инструментом качественного анализ ЗКС, но и применяться для получения вполне реалистичных оценок изменения климата и его колебаний.

#### **5. Геоинжиниринг как проблема оптимального управления.**

Удержание прироста СПТВ в пределах  $1,5 - 2,0$  °С относительно доиндустриального уровня было обозначено в Парижском соглашении по климату 2015 года как приоритетное направление по борьбе с глобальным потеплением. Достигнуть данную амбициозную цель предполагается путем перехода к низкоуглеродному развитию, в чем у нас имеются большие сомнения ввиду неэффективности глобальной системы управления, ответственной за климатическую политику, о чем говорилось ранее. Тем не менее в качестве одной из мер стабилизации климата теоретически рассматривается геоинжиниринг – активное вмешательство человека в перераспределение потока солнечного излучения за счет, например, введения в стратосферу мелкодисперсного аэрозоля, обладающего свойствами рассеивать солнечную радиацию в видимом спектральном интервале и слабо ее поглощать в инфракрасном диапазоне. Такими свойствами обладает, к примеру, сульфатный аэрозоль. Введение в стратосферу контролируемых эмиссий двуокиси серы или сероводорода (газов-предшественников) приводит в конечном итоге к образованию частиц аэрозоля. Наличие в верхней атмосфере аэрозоля способствует увеличению планетарного альбеда Земли  $\alpha_0$ , изменению радиационного баланса и, как следствие, понижению температуры у земной поверхности. Увеличение  $\alpha_0$  на 1% приводит к уменьшению потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы примерно на  $3,4 \text{ Вт/м}^2$ , что вполне сопоставимо с радиационным эффектом удвоения концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ . Для оценки эффективности геоинже-

нерных проектов и их последствий используется численное моделирование при заданных сценариях антропогенного увеличения ПГ и эвристически заданных сценариях геоинженерных воздействий. Перебор вариантов этих воздействий – не лучший и не эффективный со многих точек зрения подход. Нами геонинжиниринг рассматривается как экстремальная задача, сводящаяся к отысканию экстремума некоторого функционала, формально описывающего цель управления ЗКС при наличии различных ограничений, накладываемых на фазовые координаты и функции управления. В этом случае оптимальный закон управления и фазовая траектория управляемой системы находятся в результате решения экстремальной задачи методами оптимального управления. Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим модель (6), уравнения которой запишем в детерминированном виде с учетом радиационных эффектов стратосферного аэрозоля:

$$\begin{aligned} C(dT/dt) &= -\lambda T - \gamma(T - T_D) + \Delta R_{GHG} + \Delta R_A; \\ C_D(dT_D/dt) &= \gamma(T - T_D), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\alpha_0$  – планетарное альbedo Земли;  $\Delta R_{GHG}$  и  $\Delta R_A$  – радиационные воздействия ПГ и аэрозоля на ЗКС. Радиационный форсинг  $\Delta R_{GHG}$  аппроксимируется линейной функцией  $\Delta R_{GHG} = \eta t$ , где параметр  $\eta$  определяется по данным RCP [19] (табл. 3).

Таблица 3. Параметр  $\eta$  для различных сценариев RCP

Сценарий	RCP8.5	1%CO <sub>2</sub>	RCP6.0	RCP4.5
$\eta$ , Вт/м <sup>2</sup>	$7,14 \cdot 10^{-2}$	$5,29 \cdot 10^{-2}$	$3,81 \cdot 10^{-2}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$

Примечание. Сценарий 1%CO<sub>2</sub> соответствует росту концентрации CO<sub>2</sub> на 1% в год.

Расчет радиационного форсинга, производимого аэрозолем, выполняется по формуле  $\Delta R_A = -(1 - \alpha_A)\alpha_A Q_0$ , где  $\alpha_A$  – альbedo аэрозольного слоя ( $\alpha_A < 1$ );  $Q_0 = 342$  Вт/м<sup>2</sup> – средняя по Земному шару инсоляция [21]. Это позволяет рассматривать  $\alpha_A$  в качестве управляющей переменной. Реально мы имеем возможность управлять скоростью эмиссии аэрозольных частиц  $E_A$ , которая входит в уравнение баланса массы аэрозоля:

$$dM_A/dt = E_A - M_A/\tau_A, \quad (15)$$

где  $M_A$  – масса аэрозольных частиц, а  $\tau_A$  – время их жизни в стратосфере.

Величины  $M_A$  и  $\alpha_A$  линейно зависимы:  $M_A = \alpha_A(Q_0 S_e / \beta_A k_A)$ , где  $\beta_A = 24 \text{ Вт/м}^2$  – эмпирический коэффициент;  $k_A$  – массовый коэффициент экстинкции аэрозоля;  $S_e$  – площадь поверхности земного шара. Следовательно, при заданных  $k_A$  и  $\alpha_A$  масса аэрозоля  $M_A$  может быть легко рассчитана. В дальнейшем будем полагать, что  $k_A = 7,6 \text{ м}^2/\text{г}$ , а  $\tau_A \approx 2$  года [21]. Практически в стратосфере вводятся газы-предшественники, поэтому масса сульфатных аэрозолей и скорость их эмиссии выражаются в единицах серы и обозначаются  $E_S$  (ТгS/год) и  $M_S$  (ТгS) соответственно, учитывая, что 1 Тг серы эквивалентен 4 Тг аэрозольных частиц. Тогда уравнение (15) можно переписать в виде:

$$d\alpha_A/dt = \chi^{-1} E_A - \alpha_A/\tau_A, \quad (16)$$

где  $\chi = Q_0 S_e / 4\beta_A k_A \approx 2,39 \cdot 10^2 \text{ ТгS}$ .

Таким образом, если оптимальное управление  $\alpha_A^*(t)$  каким-то образом определено, то оптимальная скорость эмиссии сульфатных аэрозолей  $E_S^*(t)$ , обеспечивающая формирование аэрозольного слоя массы  $M_S^*(t)$ , вычисляется с помощью уравнения (16). Задача оптимального управления ЗКС рассматривается на конечном интервале времени  $t \in [t_0, t_f]$ , на котором поведение объекта управления описывается уравнениями (14) при заданных краевых условиях:

$$T(t_0) = 0, \quad T_D(t_0) = 0, \quad T(t_f) = T^f. \quad (17)$$

Из (17) следует, что в задаче левый конец фазовой траектории закреплен, а правый конец закреплен только для переменной  $T$ , тогда как для переменной  $T_D$  – свободен. Выбор граничных условий обусловлен тем, что основной интерес представляет изменение аномалии СПТВ.

Задача формулируется следующим образом: *найти управляющую функцию  $\alpha_A^*(t)$  из класса допустимых, чтобы при выполнении наложенных на систему динамических ограничений (14) и краевых условий (17) заданный функционал, характеризующий массовый расход аэрозоля*

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \alpha_A^2(t) dt \quad (18)$$

*достиг минимального значения.*

Масса аэрозоля, которая может быть доставлена в стратосферу реально ограничена имеющимися техническими возможностями, поэтому формально будем считать, что область допустимых управлений представляет собой интервал  $[0, U]$ , где  $U$  – максимально возможное альbedo аэрозольного слоя. В рассматриваемой задаче краевое условие  $T^f$  интерпретируется как допустимый прирост СПТВ на момент времени  $t_f$  (в соответствии с Парижским соглашением по климату можно принять  $T^f = 1,5 - 2,0$  °C).

Решение поставленной задачи оптимального управления выполняется на основе принципа максимума Понтрягина. Согласно этому принципу составим гамильтониан задачи при отсутствии ограничений на фазовые переменные и управление:

$$H = -\frac{1}{2}\alpha_A^2 + \psi_1(-aT + bT_D + ct - q\alpha_A) + \psi_2(pT - pT_D), \quad (19)$$

где  $a = (\lambda + \gamma)/C$ ;  $b = \gamma/C$ ;  $c = \eta/C$ ;  $q = (1 - \alpha_0)Q_0/C$ ;  $p = \gamma/C_D$ ;  $\psi_1$  и  $\psi_2$  – множители Лагранжа, удовлетворяющие сопряженной системе уравнений:

$$d\psi_1/dt = -\partial H/\partial T = aT - p\psi_2, \quad d\psi_2/dt = -\partial H/\partial T_D = -bT + p\psi_2. \quad (20)$$

Оптимальное управление доставляет максимум функции Гамильтона (19) в любой фиксированный момент времени  $t \in [t_0, t_f]$ :  $\alpha_A^* = \arg \max_{\alpha_A \in [0, U]} H(\alpha_A)$ . Соответствующее условие стационарности гамильтониана записывается следующим образом:

$$\partial H/\partial \alpha_A = -\alpha_A - q\psi_1. \quad (21)$$

Для нахождения оптимального управления и порождаемой им оптимальной фазовой траектории ЗКС требуется решить систему четырех обыкновенных дифференциальных уравнений (14), (20) с четырьмя неизвестными  $T$ ,  $T_D$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ . Три крайевых условия (17) дополняются условием трансверсальности  $\psi_2(t_f) = 0$ , так как на правом конце граничное условие для функции  $T_D$  не определено.

Выражения для оптимального альbedo аэрозольного слоя и соответствующей ему оптимальной аномалии СПТВ, полученные нами аналитически, имеют вид:

$$\alpha_A^*(t) = -C_1 q \left[ v_{11} e^{\lambda_1 t} + v_{21} e^{(\lambda_1 - \lambda_2) t f} e^{\lambda_2 t} \right], \quad (22)$$

$$T^*(t) = C_1 \left( \alpha_1 e^{\lambda_1 t} - \alpha_2 e^{\lambda_2 t} \right) + C_3 e^{-\lambda_1 t} + C_4 e^{-\lambda_2 t} + w_1 t + w_2. \quad (23)$$

Здесь  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – собственные числа, а  $v_{11}$  и  $v_{21}$  – компоненты собственных векторов матрицы коэффициентов системы сопряженных уравнений;  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_4$  – произвольные постоянные, при этом  $C_2 = -C_1 e^{(\lambda_1 - \lambda_2) t f}$ ;  $\alpha_1, \alpha_2, w_1$  и  $w_2$  – известные функции собственных чисел, собственных векторов и коэффициентов  $a, b, c, p$  и  $q$  (ввиду громоздкости мы эти функции не выписываем).

Если на аномалию СПТВ накладывается ограничение  $T \leq C_T$ , где константа  $C_T$  характеризует допустимый рост СПТВ на временном интервале  $t \in [t_0, t_f]$ , то задача существенно усложняется. В этом случае для получения оптимального решения требуется учесть условие дополняющей нежесткости:  $\mu(t)S(T, t) = 0, \mu(t) \geq 0$ , где  $S(T, t) = C_T - T(t)$ , а  $\mu(t)$  – множитель Лагранжа.

Рассмотрим в качестве примера результаты расчетов, полученные для RCP8.5 – сценария («business-as-usual» сценарий, являющийся наиболее консервативным в отношении роста концентраций ПГ). Задача рассматривается на 80-летнем интервале ( $t_0 = 2020$  год, а  $t_f = 2100$  год) при отсутствии и наличии фазового ограничения (ограничения на рост СПТВ в течение рассматриваемого периода времени). В соответствии с Парижским соглашением по климату, максимально допустимое увеличение СПТВ в 2100 году –  $2^\circ\text{C}$ . Поскольку в 2020 году ожидаемый рост СПТВ относительно доиндустриального уровня составит  $1,1^\circ\text{C}$ , то тогда фазовый ограничитель  $C_T = 2 - 1,1 = 0,9^\circ\text{C}$ . Согласно расчетам, без реализации геоинжиниринговых проектов за 80 лет СПТВ увеличится примерно на  $3,8^\circ\text{C}$  и, таким образом, значительно превысит допустимый уровень, определяемый Парижским соглашением. Применение стратосферного аэрозоля позволяет стабилизировать климат в 21 веке, обеспечив тем самым выполнение требования Парижского соглашения по климату (см. рис. 5).

Как показывают вычисления, потребная масса аэрозоля за 80-летний период составит  $36,5 \text{ TgS}$  (если фазовое ограничение отсутствует), и  $73,6 \text{ TgS}$  (если фазовое ограничение учитывается). Таким образом, если характер глобальной экономической деятельности не изменит-

ся (сценарий RCP8.5), то цели Парижского соглашения могут быть достигнуты лишь при условии реализации геоинженерных проектов. Аналогичная ситуация складывается при остальных сценариях увеличения концентрации ПГ (за исключением нереалистичного сценария RCP2.6), поскольку рассчитанные для этих сценариев увеличения СПТВ превысят доиндустриальный уровень более чем на  $2^{\circ}\text{C}$ . Из этого следует, что геоинженерные проекты могут рассматриваться в качестве одной из реальных мер стабилизации среднеглобальной приповерхностной температуры.

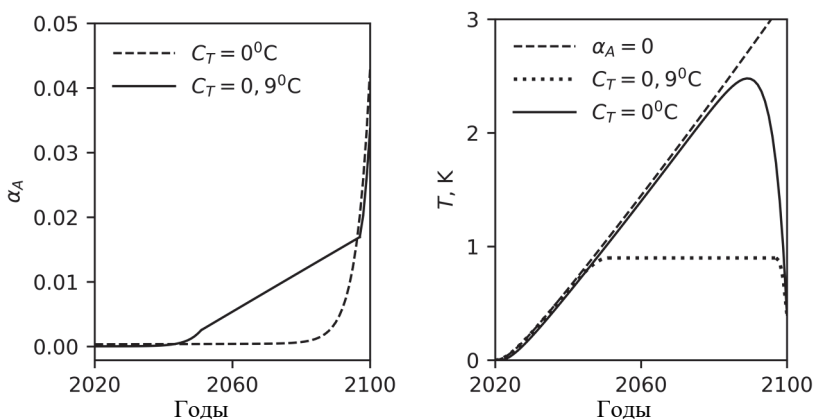


Рис. 5. Оптимальное альbedo аэрозольного слоя при наличии и отсутствии ограничений на управление и соответствующие аномалии среднеглобальной приповерхностной температуры воздуха

**6. Заключение.** Проблема современного изменения климата, обусловленного главным образом антропогенной деятельностью, занимает в спектре вызовов 21 века одно из главенствующих мест, поскольку представляет собой реальную угрозу существованию человеческой цивилизации. Решение данной проблемы невозможно без совместных усилий правительств развитых стран. Результаты наблюдений за климатической системой свидетельствуют об ускорении процессов глобального потепления на планете, что вызывает необходимость неотлагательного рассмотрения возможных мер по стабилизации глобального климата. Изменение климата воздействует на природные системы, человека и его целенаправленную, в том числе экономическую, деятельность. В данной работе проблема взаимодействия природы и общества в условиях современного изменения климата рассмотрена с позиций общей теории управления, в рамках которой система «кли-

мат-экономика» представляет собой кибернетическую систему, состоящую из субъекта управления (иерархическая система органов межгосударственного и странового управления различного уровня) и объекта управления – взаимодействующих экономической и климатической систем. Нами проанализированы слабые стороны субъекта глобального управления, каковым на сегодня является ООН в лице МГЭИК, обсуждены основные источники неопределенностей оценок изменения климата и наносимого этими изменениями экономического ущерба. Поскольку одним из основных источников неопределенностей проекций климата являются обратные связи в ЗКС, с помощью стохастических моделей климата малой размерности оценена чувствительность климатической изменчивости к вариациям коэффициента обратной связи. Полученные результаты позволяют объяснить значительные межмодельные расхождения оценок изменения климата, рассчитанных с помощью современных климатических моделей высокой степени сложности. В связи с тем, что предлагаемые МГЭИК меры по стабилизации климата Земли по существу являются борьбой не с причиной, а со следствием, в качестве радикальной адаптационной меры нами видится геоинжиниринг. В статье проблема стабилизации климата в 21 веке рассмотрена как оптимизационная задача, решение которой получено методами теории оптимального управления.

Настоящая работа носит концептуальный характер, проблемы, затрагиваемые в ней, являются по своей сути междисциплинарными и настолько сложными, что их постановка и решение под силу только большому коллективу экспертов, представляющих различные области научного знания. Статья открывает цикл публикаций, посвященных исследованию взаимодействия общества и природы в условиях изменяющегося с нарастающей скоростью климата и возможностей человека управлять этими изменениями. Мы надеемся, что статья послужит неким триггером для научной дискуссии и аргументации по поводу комплекса вопросов, рассмотренных в ней в постановочном плане.

### **Литература**

1. The Millennium Project. Global futures studies and research. URL: [www.millennium-project.org/15-global-challenges](http://www.millennium-project.org/15-global-challenges) (дата обращения: 24.12.2019).
2. *Bradley R.* Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary // Elsevier. 2015. 696 p.
3. NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report – December 2018. URL: [www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201812](http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201812) (дата обращения: 21.12.2019).
4. *Stocker T.F. et al.* Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // University Press. 2013. 1535 p

5. NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monthly Mean CO<sub>2</sub>. URL: [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html) (дата обращения: 21.12.2019).
6. *Ripple W.J. et al.* World scientists' warning of a climate emergency // *BioScience*. 2019. Issue 1. vol. 70. pp. 8–12.
7. *Santer B.D. et al.* Celebrating the anniversary of three key events in climate change science // *Nature Climate Change*. 2019. vol. 9. no. 3. pp. 180–182.
8. *Diem C.* There is no climate emergency, say 500 experts in letter to the United Nations. URL: [www.aei.org/carpe-diem/there-is-no-climate-emergency-say-500-experts-in-letter-to-the-united-nations](http://www.aei.org/carpe-diem/there-is-no-climate-emergency-say-500-experts-in-letter-to-the-united-nations) (дата обращения: 21.12.2019).
9. *Foster P.* Half a century of robust climate models // *Nature*. 2017. vol. 545. pp. 296–297.
10. *Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of the CMIP5 and the experimental design // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. vol. 93. pp. 485–498.
11. *Дымников В.П., Лысков В.Н., Володин Е.М.* Моделирование климата и его изменений: современные проблемы // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. № 3. С. 227–236.
12. *Lupo A., Kininmonth W., Armstrong J.S., Green K.* Global climate models and their limitations // *Climate change reconsidered II: Physical Science*. 2013. vol. 9. 139 p.
13. *Wang Z., Wu J., Liu C., Gu G.* Integrated assessment models of climate change economics // *Springer Singapore*. 2017. 181 p.
14. *Pindyck R.S.* The use and misuse of models for climate policy // *Review of Environmental Economics and Policy*. 2017. vol. 11. pp. 100–114.
15. *Nordhaus W.* Scientific and economic background on DICE models. URL: <https://sites.google.com/site/williamdnordhaus/dice-rice> (дата обращения: 04.12.2019).
16. *Board O.S., National Research Council.* Climate intervention: Carbon dioxide removal and reliable sequestration // *National Academies Press*. 2015. 154 p.
17. *Board O.S., National Research Council.* Climate intervention: Reflecting sunlights to cool Earth // *National Academies Press*. 2015. 260 p.
18. *Soldatenko S.A.* Weather and climate manipulation as an optimal control for adaptive dynamical systems // *Complexity*. 2017. vol. 2017. 12 p.
19. *Meinshausen M. et al.* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // *Climatic Change*. 2011. vol. 109. no. 1-2. pp. 213–241.
20. *Soldatenko S.A., Yusupov R.M.* Optimal control of aerosol emissions into the stratosphere to stabilize the Earth's climate // *Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. vol. 54. pp. 480–486.
21. *Soldatenko S.A., Yusupov R.M.* Optimal control for the process of using artificial sulfate aerosols for mitigating global warming // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. vol. 32. pp. 55–63.
22. *Солдатенко С.А., Юсупов Р.М.* О выборе управляющих параметров при моделировании целенаправленной модификации погодно-климатических процессов // *Труды СПИИРАН*. 2016. Вып. 1(44). С. 153–180.
23. *Soldatenko S.A., Yusupov R.M.* On the possible use of geophysical cybernetics in climate manipulation (geoengineering) and weather modification // *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2015. vol. 11. pp. 116–125.
24. *Soldatenko S.A.* Estimating the impact of artificially injected stratospheric aerosols on the global mean surface temperature in the 21st century // *Climate*. 2018. vol. 6. no. 4. pp. 85.
25. *Гаскаров Д.В. и др.* Введение в геофизическую кибернетику // *СПб: СПбГУВК*. 1998. 165 с.
26. *Wiener N.* Cybernetics or control and communication in the animal and the machine // *Technology Press*. 1948. 194 p.
27. *Wiener R.* Cybernetics and society: *The human use of human beings* // *Houghton Mifflin*. 1950. 241 p.
36. Труды СПИИРАН. 2020. Том 19 № 1. ISSN 2078-9181 (печ.), ISSN 2078-9599 (онлайн) [www.proceedings.spiiras.nw.ru](http://www.proceedings.spiiras.nw.ru)



28. *Sickles R.C., Zelenyuk V.* Measurement of productivity and efficiency // University Press. 2019. 626 p.
29. *Fonu U.P.* World Economic Outlook: Seeking Sustainable Growth-Short-Term Recovery // Long-term challenges (International Monetary Fund Publications: Washington DC). 2017. 284 p.
30. *Rozenwasser E., Yusupov R.* Sensitivity of automatic control systems // CRC Press. 2019. 456 p.
31. *Soldatenko S.A., Yusupov R.M.* Estimating the influence of thermal inertia and feedbacks in the atmosphere–ocean system on the variability of the global surface air temperature // Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. vol. 56. pp. 591–601.
32. *Soldatenko S., Colman R.* Climate variability from annual to multi-decadal timescales in a two-layer stochastic energy balance model: analytic solutions and implications for general circulation models // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2019. vol. 71. no. 1. pp. 1–15.
33. *Солдатенко С.А., Юсупов Р.М.* Чувствительности нульмерной климатической модели и ее обратные связи в контексте проблемы управления погодой и климатом Земли // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 3(52). С. 5–31.
34. *Gambhir A. et al.* A review of criticisms of Integrated Assessment Models and proposed approaches to address these, through the lens of BECCS // Energies. 2019. vol. 12. no. 9. pp. 1747.
35. *Pindyck R.S.* Climate change policy: What do the models tell us? // Journal of Economic Literature. 2013. vol. 51. pp. 860–872.
36. *Lazo J.K., Lawson M., Larsen P.H., Waldman D.M.* United States economic sensitivity to weather variability // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. vol. 92. no. 6. pp. 709–720.
37. *Crepin A.S., Karcher M., Gascard J.C.* Arctic climate change, economy and society (ACCESS): Integrated perspectives // Ambio. 2017. vol. 46. no. 3. pp. 341–354.
38. *Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.* Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (резюме доклада) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2011. № 563. С. 7–59.
39. *Акентьева Е.М. и др.* Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации // ГГО им. А.И. Воейкова. 2017. 106 с.
40. *Солдатенко С.А. и др.* Об оценке климатических рисков и уязвимости природных и хозяйственных систем в морской арктической зоне РФ // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. № 1(64). С. 55–70.
41. *Hallegatte S., Green C., Nicholls R.J., Corfee-Vorlot J.* Future flood losses in major coastal cities // Nature Climate Change. 2013. vol. 3. no. 9. pp. 802–806.
42. *Kopp R.E. et al.* Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites // Earth Future. 2014. vol. 2. no. 8. pp. 383–406.
43. *Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of CMIP5 and the experiment design // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. vol. 93. pp. 485–498.
44. *Colman R.A., Power S.B.* What can decadal variability tell us about climate feedbacks and sensitivity? // Climate Dynamics. 2018. vol. 51. pp. 3815–3828.
45. *Soldatenko S.A.* Estimated impacts of climate change on eddy meridional moisture transport in the atmosphere // Applied Sciences. 2019. vol. 9. no. 23. pp. 4992.
46. *Ginzburg A.S., Demchenko P.F.* Anthropogenic meso-meteorological feedbacks: A review of recent research // Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. vol. 55. pp. 573–590.
47. *Hasselmann K.* Stochastic climate models. Part I. Theory // Tellus. 1976. vol. 28. pp. 473–485.

48. *Middlemas E., Clement A.* Spatial patterns and frequency of unforced decadal scale changes in global mean surface temperature in climate models // *Journal of Climate*. 2016. vol. 29. no. 17. pp. 6245–6257.
49. *Geoffroy O. et al.* Transient climate response in a two-layer energy-balance model. Part I: Analytical solution and parameter calibration using CMIP5 AOGCM experiments // *Journal of Climate*. 2013. vol. 26. no. 6. pp. 1841–1857.
50. *Demchenko P.F., Semenov V.A.* Estimation of uncertainty in surface air temperature climatic trends related to the internal dynamics of the atmosphere // *Doklady Earth Sciences*. 2017. vol. 476. pp. 1105–1108.
51. *Охтилев М.Ю. и др.* Концепция и технологии проактивного управления жизненным циклом изделий // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2020. Т. 63. № 1. С. 158–161.
52. *Ронжин А.Л. и др.* Применение технологии радиочастотной идентификации для построения системы контроля оборота бортового кухонного оборудования // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2020. Вып. 1. С. 3–10.

**Солдатенко Сергей Анатольевич** — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, лаборатория прикладной информатики и проблем информатизации общества, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: математическое моделирование геофизических процессов, геофизическая кибернетика, изменение климата, климатический риск-менеджмент, динамические системы.. Число научных публикаций — 200. prof.soldatenko@yandex.ru; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-3311.

**Юсупов Рафаэль Мидхатович** — д-р техн. наук, профессор, Член-корреспондент РАН, научный руководитель, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН),; президент, НП Национальное общество имитационного моделирования («НОИМ»). Область научных интересов: теория управления, информатика, теоретические основы информатизации и информационного общества, информационная безопасность. Число научных публикаций — 400. yusupov@iias.spb.su; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-3311.

**Колман Роберт** — Ph.D., руководитель направления, направления климатических исследований, Австралийское бюро метеорологии; эксперт, Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), сопредседатель, Австралийская научная программа по изменению климата, член Национального совета по климату. Область научных интересов: моделирование глобального климата и его изменений, обратные связи в климатической системе, чувствительность климата, прогнозирование регионального климата, анализ и оценка качества климатических моделей. Число научных публикаций — 200. robert.colman@bom.gov.au; ул. Коллинс, 700, 3008, Мельбурн, Австралия; р.т.: +61451795720.

S. SOLDATENKO, R. YUSUPOV, R. COLMAN  
**CYBERNETIC APPROACH TO PROBLEM OF INTERACTION  
BETWEEN NATURE AND HUMAN SOCIETY IN CONTEXT OF  
UNPRECEDENTED CLIMATE CHANGE**

*Soldatenko S., Yusupov R., Colman R Cybernetic Approach to Problem of Interaction Between Nature and Human Society in Context of Unprecedented Climate Change.*

**Abstract.** In this paper, from a cybernetic perspective, the human-nature interactions are considered in the context of modern climate change, unprecedented in its scale and rate caused by anthropogenic activity. The developed structure of the “climate-economy” cybernetic system is presented, the weaknesses of the global governance bodies are analysed, and the main causes of the uncertainties in assessing climate change and the economic damage caused by this change are discussed. It is noted that adaptation measures and strategies developed and implemented by governments of different countries and intergovernmental organizations do not eliminate the causes of global warming and, therefore, have limited capacities, since humans and nature can exist only under specified environmental conditions. Going beyond these conditions, due to climate change, can lead to a global biological catastrophe. Climate policy decisions are made under uncertainty due to the ambiguity of estimates of the future climate, which, in turn, is the result of an insufficiently adequate description of feedbacks in the climate system models. Using low-parametric models of the Earth's climate system, the influence of system's feedbacks on tangible inter-model differences of climate change estimates obtained using modern climate models of a high degree of complexity is illustrated. Since the climate change adaptation measures proposed by experts are not the struggle with causes, but the fight with consequences, we see geoengineering as a radical adaptation strategy. In contrast to previous studies, we consider the problem of purposefully modifying climatic conditions, implemented by geoengineering methods, within the framework of optimal control theory with mathematical formalization of geoengineering objectives and methods for achieving them. In this paper, an example of the formulation and solution of the optimization problem for stabilizing the Earth's climate through the injection of finely dispersed sulfate aerosol into the stratosphere is presented.

**Keywords:** Geophysical Cybernetics, Global Warming, Climate Change Economics, Geoengineering, Climate Engineering, Feedbacks, Optimal Control.

**Soldatenko Sergei** — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Leading Researcher, Laboratory of Applied Informatics and Society Informatization Problems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: mathematical modeling of geophysical processes, geophysical cybernetics, climate change, climate risk-management, dynamical systems.. The number of publications — 200. prof.soldatenko@yandex.ru; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-3311.

**Yusupov Rafael** — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Corresponding Member of RAS, Scientific Advisor, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS); President, NP National Simulation Society (“NSS”). Research interests: mathematical modeling of geophysical processes, geophysical cybernetics, climate change, climate risk-management, dynamical systems. The number of publications — 400. yusupov@iias.spb.su; 39, 199178, , Russia; office phone: +7(812)328-3311.

**Colman Robert** — Ph.D., Head of Division, Climate Research Division, Australian Bureau of Meteorology; Expert, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Co-Chair, Australian Climate Change Science Program, Member of the National Climate Council. Research interests: global climate modeling, climate change and variability, climate feedbacks, climate sensitivity, regional climate projection, analysis and validation of climate models. The number of publications — 200. robert.colman@bom.gov.au; 700, Collins str., 3008, Melbourne, Australia; office phone: +61451795720.

## References

1. The Millennium Project. Global futures studies and research. Available at: [www.millennium-project.org/15-global-challenges](http://www.millennium-project.org/15-global-challenges) (accessed: 24.12.2019).
  2. Bradley R. Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary. Elsevier. 2015. 696 p.
  3. NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report – December 2018. Available at: [www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201812](http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201812) (accessed: 21.12.2019).
  4. Stocker T.F. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. University Press. 2013. 1535 p
  5. NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monthly Mean CO<sub>2</sub>. Available at: [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html) (accessed: 21.12.2019).
  6. Ripple W.J. et al. World scientists' warning of a climate emergency. *BioScience*. 2019. Issue 1. vol. 70. pp. 8–12.
  7. Santer B.D. et al. Celebrating the anniversary of three key events in climate change science. *Nature Climate Change*. 2019. vol. 9. no. 3. pp. 180–182.
  8. Diem C. There is no climate emergency, say 500 experts in letter to the United Nations. Available at: [www.aei.org/carpe-diem/there-is-no-climate-emergency-say-500-experts-in-letter-to-the-united-nations](http://www.aei.org/carpe-diem/there-is-no-climate-emergency-say-500-experts-in-letter-to-the-united-nations) (accessed: 21.12.2019).
  9. Foster P. Half a century of robust climate models. *Nature*. 2017. vol. 545. pp. 296–297.
  10. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of the CMIP5 and the experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. vol. 93. pp. 485–498.
  11. Dymnikov V.P., Lykosov V.N., Volodin E.M. [Modelling of climate and its changes: contemporary problems]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk – Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Issue 82. no. 3. pp. 227–236. (In Russ.).
  12. Lupo A., Kininmonth W., Armstrong J.S., Green K. Global climate models and their limitations. *Climate change reconsidered II: Physical Science*. 2013. vol. 9. 139 p.
  13. Wang Z., Wu J., Liu C., Gu G. Integrated assessment models of climate change economics. Springer Singapore. 2017. 181 p.
  14. Pindyck R.S. The use and misuse of models for climate policy. *Review of Environmental Economics and Policy*. 2017. vol. 11. pp. 100–114.
  15. Nordhaus W. Scientific and economic background on DICE models. Available at: <https://sites.google.com/site/williamdnordhaus/dice-rice> (accessed: 04.12.2019).
  16. Board O.S., National Research Council. Climate intervention: Carbon dioxide removal and reliable sequestration. National Academies Press. 2015. 154 p.
  17. Board O.S., National Research Council. Climate intervention: Reflecting sunlights to cool Earth. National Academies Press. 2015. 260 p.
  18. Soldatenko S.A. Weather and climate manipulation as an optimal control for adaptive dynamical systems. *Complexity*. 2017. vol. 2017. 12 p.
  19. Meinshausen M. et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*. 2011. vol. 109. no. 1-2. pp. 213–241.
- 40 Труды СПИИРАН. 2020. Том 19 № 1. ISSN 2078-9181 (печ.), ISSN 2078-9599 (онлайн)  
www.proceedings.spiiras.nw.ru

20. Soldatenko S.A., Yusupov R.M. Optimal control of aerosol emissions into the stratosphere to stabilize the Earth's climate. *Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. vol. 54. pp. 480–486.
21. Soldatenko S.A., Yusupov R.M. Optimal control for the process of using artificial sulfate aerosols for mitigating global warming. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. vol. 32. pp. 55–63.
22. Soldatenko S.A., Yusupov R.M. [On the selection of control parameters in modelling of purposeful modification of weather and climate processes]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 1(44). pp. 153–180. (In Russ.).
23. Soldatenko S.A., Yusupov R.M. On the possible use of geophysical cybernetics in climate manipulation (geoengineering) and weather modification. *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2015. vol. 11. pp. 116–125.
24. Soldatenko S.A. Estimating the impact of artificially injected stratospheric aerosols on the global mean surface temperature in the 21st century. *Climate*. 2018. vol. 6. no. 4. pp. 85.
25. Gaskarov D.V. et al. *Vvedenie v geofizicheskuyu kibernetiku* [An introduction to geophysical cybernetics and environmental monitoring]. SPb: SPbGUVK. 1998. 165 p. (In Russ.).
26. Wiener N. *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*. Technology Press. 1948. 194 p.
27. Wiener R. *Cybernetics and society: The human use of human beings*. Houghton Mifflin. 1950. 241 p.
28. Sickles R.C., Zelenyuk V. *Measurement of productivity and efficiency*. University Press. 2019. 626 p.
29. Fonu U.P. *World Economic Outlook: Seeking Sustainable Growth-Short-Term Recovery. Long-term challenges* (International Monetary Fund Publications: Washington DC). 2017. 284 p.
30. Rozenwasser E., Yusupov R. *Sensitivity of automatic control systems*. CRC Press. 2019. 456 p.
31. Soldatenko S.A., Yusupov R.M. Estimating the influence of thermal inertia and feedbacks in the atmosphere–ocean system on the variability of the global surface air temperature. *Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. vol. 56. pp. 591–601.
32. Soldatenko S., Colman R. Climate variability from annual to multi-decadal timescales in a two-layer stochastic energy balance model: analytic solutions and implications for general circulation models. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2019. vol. 71. no. 1. pp. 1–15.
33. Soldatenko S.A., Yusupov R.M. [Sensitivity and feedback loops in a zero-dimensional climate model in the context of weather and Earth's climate control]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2017. vol. 52. pp. 5–31. (In Russ.).
34. Gambhir A. et al. A review of criticisms of Integrated Assessment Models and proposed approaches to address these, through the lens of BECCS. *Energies*. 2019. vol. 12. no. 9. pp. 1747.
35. Pindyck R.S. Climate change policy: What do the models tell us? *Journal of Economic Literature*. 2013. vol. 51. pp. 860–872.
36. Lazo J.K., Lawson M., Larsen P.H., Waldman D.M. United States economic sensitivity to weather variability. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2011. vol. 92. no. 6. pp. 709–720.
37. Crepin A.S., Karcher M., Gascard J.C. Arctic climate change, economy and society (ACCESS): Integrated perspectives. *Ambio*. 2017. vol. 46. no. 3. pp. 341–354.
38. Katssov V.M., Porfir'ev B.N. [Assessment of the macroeconomic effects of climate change in the Russian Federation for the period up to 2030 and further perspectives].

- tives (report summary)]. *Trudy Glavnoj geofizicheskoj observatorii im. A.I. Voejkova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov]. 2011. vol. 563. pp. 7–59. (In Russ.).
39. Akent'eva E.M. et al. *Doklad o klimaticeskikh riskah na territorii Rossijskoj Federacii* [Report on climate risks in the Russian Federation]. GGO im. A.I. Voejkova. 2017. 106 p. (In Russ.).
  40. Soldatenko S.A. et al. [On the assessment of climate risks and vulnerability of natural and economic systems in the marine Arctic zone of the Russian Federation]. *Problemy Arktiki i Antarktiki – Arctic and Antarctic Research*. 2018. vol. 1(64). pp. 55–70. (In Russ.).
  41. Hallegatte S., Green C., Nicholls R.J., Corfee-Vorlot J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*. 2013. vol. 3. no. 9. pp. 802–806.
  42. Kopp R.E. et al. Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth Future*. 2014. vol. 2. no. 8. pp. 383–406.
  43. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2011. vol. 93. pp. 485–498.
  44. Colman R.A., Power S.B. What can decadal variability tell us about climate feedbacks and sensitivity? *Climate Dynamics*. 2018. vol. 51. pp. 3815–3828.
  45. Soldatenko S.A. Estimated impacts of climate change on eddy meridional moisture transport in the atmosphere. *Applied Sciences*. 2019. vol. 9. no. 23. pp. 4992.
  46. Ginzburg A.S., Demchenko P.F. Anthropogenic meso-meteorological feedbacks: A review of recent research. *Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. vol. 55. pp. 573–590.
  47. Hasselmann K. Stochastic climate models. Part I. Theory. *Tellus A*. 1976. vol. 28. pp. 473–485.
  48. Middlemas E., Clement A. Spatial patterns and frequency of unforced decadal scale changes in global mean surface temperature in climate models. *Journal of Climate*. 2016. vol. 29. no. 17. pp. 6245–6257.
  49. Geoffroy O. et al. Transient climate response in a two-layer energy-balance model. Part I: Analytical solution and parameter calibration using CMIP5 AOGCM experiments. *Journal of Climate*. 2013. vol. 26. no. 6. pp. 1841–1857.
  50. Demchenko P.F., Semenov V.A. Estimation of uncertainty in surface air temperature climatic trends related to the internal dynamics of the atmosphere. *Doklady Earth Sciences*. 2017. vol. 476. pp. 1105–1108.
  51. Ohtilev M.Yu. [The concept and technology of proactive business lifecycle management]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2020. Issue 63. no. 1. pp. 158–161. (In Russ.).
  52. Ronzhin A.L. [Application of radio frequency identification technology to build a system for controlling the turnover of on-board kitchen equipment]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya – Questions of radio electronic. Series: Television Technique*. 2020. vol. 1. pp. 3–10. (In Russ.).