

Моделирование сценариев адаптации региональных социоэколого-экономических систем к глобальным изменениям климата

К. С. Гончарова¹  , Т. О. Загорная² , А. О. Коломыцева² 

¹ Югорский государственный университет,
г. Ханты-Мансийск, Россия

² Донецкий государственный университет,
г. Донецк, Россия

 ksenia.gon4arowa@gmail.com

Аннотация. Актуальность обуславливается тем, что в последние десятилетия развитие территорий государств и регионов подвержено существенному влиянию глобальных климатических изменений, вследствие чего происходит трансформация отдельных экосистем, что в свою очередь негативно сказывается на качестве жизни населения, развитии отраслей и комплексов экономики. Все указанное актуализирует задачу разработки инструментов и моделей оценки последствий такого влияния, а также выдвигает на первый план необходимость разработки особого адаптивного механизма управления социоэколого-экономической системой с учетом влияния климатических изменений. Соответственно, целью работы являлась разработка модели реализации сценариев и прогнозирования последствий глобального изменения климата для региональных социоэколого-экономических систем. Авторами была выдвинута гипотеза о возможности разработки и построения инструментальной численной модели, позволяющей на основе долговременных статистических данных моделировать сценарии адаптации разноуровневых (как глобальных, так и региональных) социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата. В работе был использован комплекс общенаучных и экономико-математических методов, взаимно дополняющих друг друга, в том числе методы абстрактно-логического анализа, анализа главных компонент, методы системной динамики и др. Были получены следующие результаты: во-первых, разработана аналитическая модель адаптивного развития региональной социоэколого-экономической системы; во-вторых, обоснован перечень базовых предпосылок, оказывающих на данную систему основополагающее влияние вследствие климатических изменений; в-третьих, предложена прогнозная модель устойчивой траектории развития региональной социоэколого-экономической системы в условиях глобального изменения климата. Научная значимость исследования состоит в расширении научных знаний о подходах к моделированию сценариев адаптации социоэколого-экономических систем к глобальным изменениям климата. Практическая значимость состоит в возможности использования результатов при разработке планов адаптации регионов России к изменениям климата, в том числе в сферах природопользования и хозяйственной деятельности; гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Ключевые слова: прогнозирование последствий; модели; социоэколого-экономические системы; качество жизни; окружающая среда; уязвимость; глобальное изменение климата; регион; адаптация.

1. Введение

Поиски решения проблемы сокращения антропогенной нагрузки и сохранения окружающей среды имеют достаточно длительную историю. Так, впервые эти вопросы начали подниматься на национальном уровне как минимум с начала XX века, а ее глобальная институционализация (реализуемая зачастую посредством или при участии ООН) началась с 70-х гг. XX в.

При этом после выхода в 1972 г. доклада «Пределы роста» характер и направленность дискуссии сместились в социально-экономическую плоскость. По мнению авторов указанной работы, для достижения равновесного состояния общественного развития (куда включены экологическая и природоохранная детерминанты) «отдельная страна могла бы приспосабливаться к меняющимся внутренним и внешним факторам путем увеличения или снижения либо численности населения, либо запасов капитала, либо и того и другого вместе, идя навстречу сознательно поставленной цели низкими темпами и в управляемом режиме» [1]). Изложенные в докладе положения стали основой для концепции устойчивого развития, рассматривающей динамику социальной, экономической и экологической систем как единый, сбалансированный механизм.

Необходимость комплексного решения проблем экономического роста и неравенства (экономика), динамики населения, миграции (социально-демографические аспекты), охраны окружающей среды (экология) и стихийных бедствий (глобальное изменение климата) подчеркивается ежегодно, с конца 80-х гг., в докладах Генерального секретаря ООН. Так, в одном из отчетов говорится, что, «чем больше человек размышляет о многих экономических и социальных проблемах современности, тем более очевидным становится их мно-

гомерный характер, предполагающий тесное взаимодействие между экономическими, социальными, а иногда и политическими переменными. Начинает осознаваться симбиоз развития, окружающей среды и населения» [2, с. 11], а в Ежегоднике ООН за 1988 г. отмечается, что «больше внимания будет уделяться регулярному мониторингу и комплексному изучению основных экономических, социальных и экологических тенденций <...> в рамках Секретариата в некоторых областях» [3, с. 703].

В связи с этим с начала 2000-х гг. появилась потребность не только в прогнозах глобальных и региональных климатических изменений климата и их последствий, но и обосновании направлений и способов адаптации к ним населения и национальных экономик. Последнее стало предпосылкой разработки комплекса разного класса моделей оценки и управления рисками, управления взаимодействием участников процессов адаптации, управления ресурсами и др.

К настоящему времени ключевым вектором реализации глобальной концепции устойчивого развития в национальных государствах становится подготовка и проведение комплекса социально-экономических и экологических мероприятий, разрабатываемых в контексте предупреждения и решения последствий изменения климата (т.е. адаптации). Соответственно, сегодня на фоне глобального изменения климата задача прогнозирования его последствий, проявляющихся в масштабах как локальных территорий, так и государств, представляется исключительно актуальной, поскольку от успешности ее решения зависят, с одной стороны, размеры ущерба, причиненного национальной экономике; с другой — своевременность мер по адаптации населения и отраслей, направленных на его снижение.

Цель исследования — разработка модели реализации сценариев и прогнозирования последствий глобального изменения климата для региональных социоэколого-экономических систем.

Гипотеза исследования — возможность разработки и построения инструментальной численной модели, позволяющей на основе долговременных статистических данных моделировать сценарии адаптации разноуровневых (как глобальных, так и региональных) социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата.

Структура работы. По результатам обзора состояния изученности выделены инструментальные вопросы прогнозистического моделирования комплексной адаптации социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата как недостаточно изученные. Были проанализированы современные методические подходы к исследованию процессов адаптации социоэколого-экономических систем и обосновано применение для поставленной цели моделей системной динамики. Затем была разработана схема адаптивно-имитационного моделирования траектории развития региональной социоэколого-экономической системы под влиянием климатических изменений, апробированная на примере северных регионов Западной Сибири.

2. Обзор литературы

2.1. Обзор исследований взаимосвязи адаптации социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата

Вопросам исследования взаимосвязи адаптации различных элементов национальных и/или региональных социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения

климата посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных ученых.

Радионов и др. [4], используя методику климатического анализа гидрометеорологических параметров Северной полярной области и арктических морей России (подготовленной в ФГБУ «АНИИ»), исследовали ключевые характеристики текущего состояния эколого-климатической системы АЗРФ.

Анисимов и Инстанес [5] на основе разработанного методического инструментария (включающего рассмотрение методов физико-математического моделирования, статистического исследования и пространственного анализа) исследовали вопросы социально-экономических последствий таяния вечной мерзлоты в соответствующих регионах России. Авторы предложили возможные направления совершенствования государственной политики, а именно — адаптации последней к прогнозируемым изменениям вечной мерзлоты.

Azevedo et al. [6], оперируя авторским методическим инструментарием, включающим анализ панельных данных, провели оценку взаимосвязи динамики климатических изменений и эффективности реализации инициатив местных органов власти Португалии, Швеции и Великобритании в области смягчения последствий изменения климата (сокращения объема используемой энергии и выбросов парниковых газов).

Marzi et al. [7], применяя комплекс статистических и экономико-математических методов, в том числе разработанный для регионального и субрегионального административных уровней индекс адаптивной способности, измерили в контексте адаптации к изменению климата адаптационный потенциал социоэколого-экономических систем регионов Италии.

Kjellström et al. [8], опираясь на региональную климатическую модель RCA4, разработанную the Rossby Centre, рассмотрели следствия глобального изменения климата для социоэколого-экономических систем Швеции.

Amuakwa-Mensah et al. [9] с помощью набора эконометрических методов также исследовали влияние глобального изменения климата на уровень заболеваемости населения Швеции.

Thomson et al. [10], используя методику, позволяющую обобщить результаты многомерного эконометрического анализа (оценки коэффициентов взаимной корреляции и модели регрессии Пуассона), описали в контексте взаимосвязи уровня заболеваемости и глобального изменения климата адаптивные механизмы населения штата Квинсленд (Австралия).

Zandvoort et al. [11], исходя из результатов сравнительного подхода, а также метода построения 4-шаговой карты путей адаптации, обосновали перечень инструментов институционального адаптивного планирования развития социоэколого-экономических систем Португалии, Чехии и Нидерландов в условиях глобального изменения климата.

Appleby-Arnolda et al. [12] на основе проведенного социологического опроса (метод фокус-группы) установили наличие взаимосвязи между социокультурными факторами, обуславливающими поведение и восприятие населения о Мальта и степенью его устойчивости к климатическим рискам и угрозам.

Таким образом, к настоящему времени остаются мало исследованными вопросы прогностического (сценарного) моделирования комплексной адаптации социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата. Настоящая работа направлена на устранение данного исследовательского пробела.

2.2. Обзор методических подходов к исследованию процессов адаптации социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата

Несмотря на широкий исследовательский интерес к рассматриваемой проблематике для ее апробации, в большинстве публикаций авторы сосредотачивают свое внимание на возможностях использования, экономико-статистических, в том числе эконометрических методов.

Алексеев и др. [13] использовали методы корреляционного анализа временных рядов, корреляционного и факторного анализа для оценки причин и следствий климатических колебаний.

Лобанов и Тоцакова [14], Смирнова и др. [15], исследуя детерминанты и особенности климатической динамики, опирались на метод оценки трендов.

Пестерева и др. [16] при анализе влияния изменения климата на динамику развития туристической отрасли России также опирались на метод оценки линейного тренда.

Yigini & Panagos [17] для оценки устойчивости к глобальным изменениям климата наземных экосистем использовали методический подход, основывающийся на комплексном использовании регрессионного кригинга и аппроксимации данных.

Thom at al. [18], также решая задачу исследования зависимости развития наземных экосистем от глобального изменения климата, использовали в том числе пермутационный многомерный дисперсионный анализ (PERMANOVA) и построение обобщенных аддитивных моделей (GAM).

Sao at al. [19] при анализе взаимосвязи климатических изменений и динамикой заболеваемости в городах КНР применяли метод обобщенного урав-

нения оценки (GEE) с распределением Пуассона.

Theusme at al. [20], исследуя проблему влияния глобального изменения климата на развитие сельского хозяйства (животноводства) в мексиканском регионе штата Нижняя Калифорния, обращались к методам дисперсионного и регрессионного анализа.

Wang at al. [21], анализируя зависимость распространения и изменения пространственной структуры насекомых-вредителей от климатических изменений, использовали методы кластерного (метод случайного леса и градиентный бустинг) и регрессионного анализа.

Реже авторами используются математические методы.

Zhou at al. [22], исследуя степень устойчивости социоэколого-экономических систем отдельных государств к последствиям глобального изменения климата, обратились в методическом аспекте к методам построения индексов, кластерному анализу и построению каскадной сверточной нейронной сети.

Mishra at al. [23], решая задачу, схожую с Zhou at al. [22], использовали метод качественного сравнительного анализа (QCA).

Gazol & Camarero [24] при проведении оценки влияния глобального изменения климата на гибель деревьев в лесах Европы опирались на метод двумерного анализа копул.

Manne at al. [25] с целью организации соответствующего мониторинга разработали программное обеспечение для построения модели оценки региональных и глобальных последствий политики сокращения выбросов парниковых газов.

В то же время исследователями предлагается метод, позволяющий объединить указанные этапы в рамках еди-

ной, системно-динамической модели, позволяющей раскрыть и описать механизм функционирования сложных систем, основанный на принципах взаимосвязи (причинно-следственных связях) и динамики развития отдельных элементов подсистем и системы в целом.

Li at al. [26] разработали модель системной динамики для исследования устойчивости социоэколого-экономических систем Гонконга (землепользования и городского развития).

Wang & Fu [27] использовали методы системной динамики для анализа и прогнозирования пропускной способности водной среды как предпосылки экологической безопасности и гармоничного развития провинции Шаньси (КНР).

Vermeulen-Miltz at al. [28] используют системно-динамический подход для прогнозирования состояния морской экосистемы залива Алгоа (ЮАР).

Wang at al. [29] указывают, что «моделирование системной динамики является идеальным инструментом для изучения сложных взаимодействий и динамического поведения в сложных системах», который «успешно применяется для решения проблем в таких областях, как <...> оценка рисков изменения климата и исследования стихийных бедствий» [29, с. 2].

Лычкина [30], Маслобоев и Путилов [31] отмечают возможность моделей системной динамики (на основе расчета прогнозных сценариев) проводить оценку реализуемой и планируемой к реализации политики.

Соответственно, для построения прогнозных сценариев адаптации социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата наиболее перспективным можно считать именно модели системной динамики, позволяющие исследовать сложные явления и процессы в комплек-

се, без критической привязки к трендам временных рядов, в отличие от эконометрических моделей.

3. Методы и материалы

3.1. Этапы исследования

Анализ методических подходов к исследованию процессов адаптации социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата позволяет выделить шесть традиционных для исследований данной тематики методических этапов.

На *первом этапе* устанавливается факт климатических изменений [32]. Последовательность действий на данном этапе представляется следующим образом: на отдельных объектах, так называемых «ключевых участках», осуществляется мониторинг климатических параметров, результаты которого в последующем сравниваются с прошлыми значениями, затем усредняются и экстраполируются на всю исследуемую территорию [33, 34].

Второй этап заключается в определении факторов, обуславливающих изменение климата.

На *третьем этапе* на основе данных мониторинга, а также динамики установленных детерминант разрабатываются прогностические сценарии изменения климата.

На *четвертом этапе* выявляются риски и последствия прогнозируемых климатических тенденций для функционирования социоэколого-экономических систем.

Пятый этап основывается на оценке действующей политики в сферах глобального изменения климата и адаптации к его последствиям социоэколого-экономических систем.

На завершающем, *шестом, этапе*, на основе выявленных тенденций и определения эффективности управления исследуемыми процессами пред-

полагается дальнейшая работа по совершенствованию политики адаптации социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата.

В целом настоящее исследование также опирается на данный методический подход. Однако для решения комплексных задач пространственного социально-экономического развития отдельных регионов, макрорегионов или государства в целом требуется разработка сложного управленческого механизма, основанного на принципах выявления диспропорций, системности факторов, адаптивности используемых управленческих воздействий.

3.2. Принципы моделирования адаптивного развития

Разработка и реализация на практике такого управленческого механизма должна базироваться на решении задачи оптимизации выбора эффективной модели воздействия, формировании адаптивной структуры параметров и характеристик, поиска особых режимов взаимодействия в подсистемах, а также выбора критерия целевой функции как вектора развития территории в новых условиях. Ключевыми инструментальными принципами функционирования данного управленческого механизма, его апробация и внедрение должны являться структурная и параметрическая адаптация.

В то же время моделирование адаптивного развития региональной социоэколого-экономической системы также требует учета ряда принципов:

- 1) нестационарности самой изучаемой системы и собственно среды (климатический ландшафт), которая оказывает влияние;
- 2) требования к точности и гибкости формирования управленческого решения, как комплекса мероприятий;

3) нарушение динамического равновесия системы и среды в силу наличия диспропорций в развитии, что актуализирует задачу формирования целей функции адаптивного развития региональной социоэколого-экономической системы;

4) трудностей масштабирования итогов анализа и результатов моделей в системе принятия решения ввиду случайного характера климатических воздействий и специфики отдельных региональных подсистем.

В рамках начальной стадии решения поставленной задачи назовем адаптивной системой такую, в которой с помощью подсистем (блоков) могут меняться структура и параметры сложного объекта в динамике. При этом мы учитываем наличие неопределенности информации как об управляемой системе, так и о влиянии внешней среды (в нашем случае климатического ландшафта).

Структурная адаптация предполагает необходимость учета изменений в объекте (регион) средствами параме-

трической адаптации и заключается в изменении структуры системы принятия решений относительно изменяющихся условий функционирования подсистем (отраслей) и объектов управления.

Параметрическая адаптация — это часть структурной адаптации, настройка параметров модели в соответствии с выявленными признаками (угрозами, воздействиями). Во временном срезе адаптация должна рассматриваться как адаптация по итогам функционирования системы (климатические изменения, текущее состояние отраслей и комплексов в регионе), так и адаптация к будущим условиям функционирования (после проявления климатических изменений различной природы и глубины).

3.3. Аналитическая модель адаптивного развития

Учитывая вышеизложенное, представим аналитическую модель адаптивного развития региональной социоэколого-экономической системы (рис. 1).

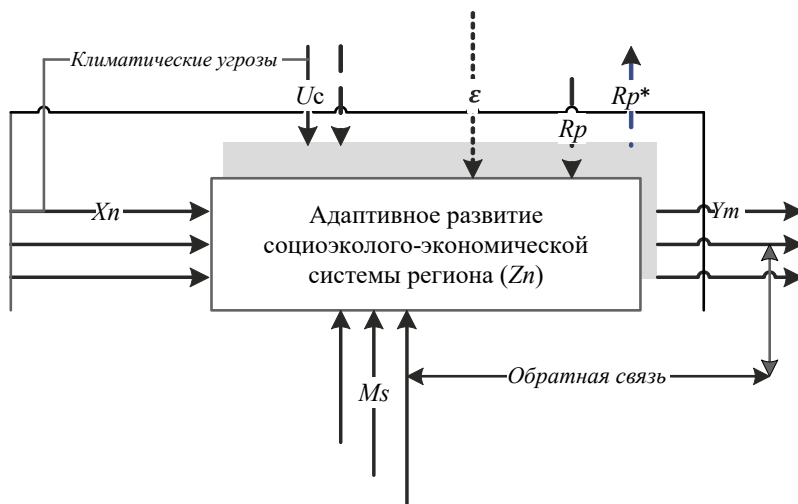


Рис. 1. Аналитическая модель адаптивного развития региональной социоэколого-экономической системы

Figure 1. Analytical model of adaptive development of the regional socio-ecological-economic system

Источник: составлено авторами.

X_n — входы в систему, т. е. данные о климатических изменениях в регионе; U_c — выявленные угрозы климатических изменений на адаптивное развитие региональной социоэколого-экономической системы, т. е. $U_c = f(X_n)$; R_p — существующие условия в подсистемах регионального функционирования отраслей и комплексов (*as is*); R_p^* — прогнозируемые параметры изменений в подсистемах регионального функционирования отраслей и комплексов (*to be*); Y_m — выходы системы, т. е. ожидаемые последствия климатических изменений для отраслей и комплексов региона, причина изменения вектора регионального развития:

$$Y_m = f(U_c; R_p \rightarrow R_p^*; \varepsilon), \quad (1)$$

где ε — неконтролируемые факторы, случайная компонента сценарно-имитационной модели; Z_n — целевая функция адаптивного развития региональной социоэколого-экономической системы:

$$Z_n = f(Y_m; R_p^*; M_s), \quad (2)$$

где M_s — комплекс мероприятий по снижению негативных последствий климатических изменений на адаптивное развитие региональной социоэколого-экономической системы.

3.4. Базовый алгоритм управления последствиями климатических изменений

Для идентификации последствий и угроз влияния изменения климата входными данными являлись данные об изменении климата в анализируемых регионах — северных территориях Западной Сибири. Эти территории отличаются наиболее выраженными рисками и угрозами, связанными с изменением климата.

Цаликов [35] указывает, что «на севере Западной Сибири ежегодно фикси-

руется около 35 тыс. отказов и аварий на коммуникациях, газо-, нефте- и трубопроводах. Более пятой части этих аварий связано с механическими воздействиями, т. е. с потерей устойчивости, и это изменения, происходящие под воздействием климата» [35, с. 160–161].

При этом расчет по предлагаемому алгоритму для второго и последующего регионов будет основой сравнительного анализа, который позволит выделить общие и отличные наборы мероприятий, предложить систему поддержки принятия решений если отличия будут существенными.

С целью верификации полученных результатов в основе предлагаемой модели был заложен синтез двух базовых подходов к изучению многоуровневых, комплексных процессов, а именно параметрической и структурной адаптации.

Этот синтез положен в основу авторского концептуального подхода к выявлению адаптивной составляющей для снижения негативных последствий влияния климатических факторов на развитие социоэколого-экономической системы (рис. 2).

Для апробации разработанной аналитической модели была использована разработанная и зарегистрированная авторами статьи информационная база данных¹, содержащая динамические наборы данных о регистрируемых на территории ХМАО и ЯНАО процессах и явлениях касающихся, с одной стороны социоэколого-экономической системы, с другой — климатических изменений.

¹ Интегрированная пространственно-временная база данных, характеризующих последствия изменения климата, влияющие на социально-экономическое развитие северных территорий Западной Сибири. Номер регистрации (свидетельства): 2023622872. Дата регистрации: 22.08.2023. Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего 2023622546 от 02.08.2023.

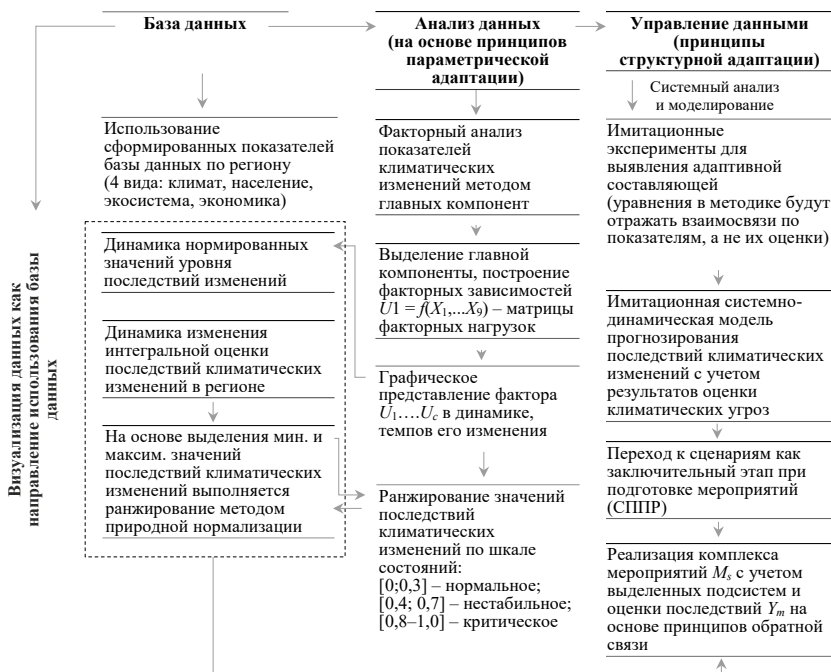


Рис. 2. Базовый алгоритм управления последствиями климатических изменений в региональной социоэколого-экономической системе

Figure 2. Basic algorithm for managing the effects of climate change in the regional socio-ecological and economic system

Источник: составлено авторами.

Основные показатели, собранные в этой базе данных и используемые в настоящем исследовании, группируются по направлениям: 1) данные о гидрометеорологических процессах; 2) данные, описывающие влияние климатических изменений на динамику экосистем; 3) данные, характеризующие воздействие климата на условия жизни населения; 4) данные, характеризующие влияние климата на состояние отдельных отраслей экономики региона.

4. Результаты исследования

4.1. Выявление угроз климатических изменений адаптивного развития региональной социоэколого-экономической системы

Основываясь на показателях, характеризующих набор климатических изме-

нений (описываемых как $X_1^c, X_2^c, \dots, X_n^c$) на территории северных регионов Западной Сибири, авторами были выделены три вида влияния климатических изменений, рекомендуемых в 2022 г. Росгидрометом¹, в частности угрозы уровню жизни населения, угрозы экосистеме региона, угрозы отраслям экономики (рис. 3).

Так, было предусмотрено, что каждый вид выделенных c — угроз (U^c) как ключевой обобщающий признак характеризуется набором показателей в соответствующей группе данных и имеет уровень:

$$U^c = f^c(X_1^c, X_2^c, \dots, X_n^c), \quad (3)$$

¹ Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Росгидромет. СПб., 2022. 124 с.



Рис. 3. Классификация видов влияния изменения климата
Figure 3. Classification of types of climate change impacts

Источник: составлено авторами.

где n — число показателей, которые описывают характер и специфику климатических изменений.

В связи с тем, что число n было достаточно большим, нами была решена задача уменьшения размерности информационного пространства показателей,

которые формируют климатический ландшафт, его вектор и параметрические характеристики.

Результирующий показатель уровня угроз изменения и влияния климата был получен как ключевая характеристика, показатель-репрезентант, главная ком-

понента. Для каждой c -угрозы ($c = 3$) из исходной совокупности было сформировано отношение вида:

$$U^c = X_k^{sr}, k = [1, n]. \quad (4)$$

При этом каждый показатель исходной совокупности рассматривался как точка в T -мерном пространстве, где T — число рассмотренных периодов влияния климата (5–10 лет).

Показатели и уровень адаптации региональной социоэколого-экономической системы к последствиям

изменения климата, по сути, раскрывались через выявление набора c -угроз (U^c) как ключевой компоненты.

Сформировав дополнительную базу данных групп показателей по трем подсистемам заданной классификации, мы выяснили, что такие показатели являются производными и во многом классически оценивают параметрические характеристики функционирования и развитие отраслей региона. Они условно отражают взаимодействие элементов «население — экономика — экология — климат» (табл. 1).

Таблица 1. Оценочные показатели функционирования подсистем как источники возникновения соответствующих угроз климатических изменений

Table 1. Estimated indicators of the functioning of subsystems as sources of the corresponding threats of climate change

№	Характеристика показателя климатических изменений	Условное обозначение
<i>Показатели оценки влияния климатических изменений уровня жизни населения в регионе</i>		
1.1	Изменение уровня безработицы в регионе, %	X_1
1.2	Доля населения с доходами ниже прожиточного минимума, %	X_2
1.3	Темп роста потребления основных продуктов питания на душу населения, %	X_3
1.4	Удельный вес детей в возрасте до 18 лет в регионе, %	X_4
1.5	Среднедушевые денежные доходы населения по субъектам, руб./мес.	X_5
1.6	Уровень экономически активного населения в работоспособном возрасте, %	X_6
<i>Показатели оценки влияния климатических изменений на экосистему в регионе</i>		
2.1	Увеличение антропогенной нагрузки (загрязнение воды, почв, воздуха), количество случаев	X_7
2.2	Изменение средней температуры воздуха и климатический дисбаланс, %	X_8
2.3	Уровень качества жилищного фонда и объектов инфраструктуры в регионе, %	X_9
2.4	Уровень пожароопасности в регионе, %	X_{10}

Окончание табл. 1

№	Характеристика показателя климатических изменений	Условное обозначение
	<i>Показатели оценки влияния климатических изменений на функционирование отраслей в регионе</i>	
3.1	Индекс промышленного производства, %	X_{11}
3.2	Инвестиции в основной капитал, млн руб.	X_{12}
3.3	Объем посевных площадей сельскохозяйственных культур, млн га	X_{13}
3.4	Индекс производства сельскохозяйственной продукции, %	X_{14}
3.5	Объем жилищного строительства, тыс. м ²	X_{15}
3.6	Доля инвестиций в машины, оборудование, транспортные средства в общем объеме инвестиций в основной капитал, направленных на реконструкцию и модернизацию, %	X_{16}
3.7	Уровень аварийности в коммуникационных системах, газо-, нефтепроводах, %	X_{17}

Источник: составлено авторами.

Соответственно, далее нами решалась задача рассмотреть эти подсистемы комплексно, не ограничиваясь статичным подходом, т. е. масштабировать данные в динамике за период 5–10 лет, чтобы влияние климатических изменений давало новую картину. При этом в дальнейшем на стадии имитационного моделирования переход от сценария к сценарию носил обоснованный характер.

При классификации угроз населению климатического характера нами были выделены три главные компоненты: U_1 — отражает последствия влияния климатических изменений на общий уровень жизни населения в регионе, U_2 — отражает влияние климатических изменений на экосистему региона, U_3 — отражает влияние климатических изменений на отрасли экономики региона.

В табл. 2 представлены полученные факторные нагрузки ($U_1 = f(X_1, \dots, X_{17})$) — матрица факторных нагрузок).

В результате нами были получены следующие уравнения главных компо-

нент по выделенным угрозам U_1 , U_2 и U_3 соответственно:

$$U_1 = -0,15X_5 - 0,14X_9 - 0,18X_{12} + 0,17X_{13} - 0,18X_{17}$$

$$U_2 = -0,31X_3 + 0,22X_4 - 0,29X_{16}$$

$$U_3 = -0,41X_5 + 0,34X_{15}$$

Таким образом, выделенные факторные признаки вполне обоснованно аккумулируют на уровне полученных оценок последствия климатического воздействия, что позволяет не только «разобрать» факторы на компоненты (структурный анализ), но и выделить ключевые признаки, тем самым проследить сложные нелинейные взаимосвязи в такой комплексной системе как «население — экономика — экология — климат».

Поскольку факторные нагрузки являются коэффициентами корреляции между исходными показателями и глав-

ными компонентами, то на основе анализа их значений нами был определен перечень базовых предпосылок (параметров), которые оказывают наиболее существенной влияния на соответствующую угрозу:

– для угрозы ухудшения уровня экономического развития под влиянием климатических изменений определяю-

щим является объем инвестиций в основной капитал (–0,92);

– для угрозы снижения качества жизни населения определяющим является потребление основных продуктов питания на душу населения (–0,89);

– для угрозы разрушения инфраструктуры определяющим является высокий уровень пожароопасности (–0,88).

Таблица 2. Матрица факторных нагрузок – оценка главных компонент в системе адаптации региональной социоэколого-экономической системы к влиянию климатических изменений

Table 2. Matrix of factor loads – assessment of the main components in the system of adaptation of the regional socio-ecological-economic system to the impact of climate change

Условное обозначение	U_1	U_2	U_3
X_1	–0,5258	0,066	–0,4982
X_2	0,5251	0,3679	0,265
X_3	0,0732	–0,8919	0,0438
X_4	0,2037	0,7729	0,3993
X_5	–0,7447	0,2563	0,0689
X_6	–0,1204	–0,5096	–0,0095
X_7	0,3029	0,5646	0,1561
X_8	0,4234	0,1138	–0,1699
X_9	–0,7922	–0,3474	–0,048
X_{10}	0,0556	–0,1226	–0,8773
X_{11}	0,4868	–0,0845	–0,4752
X_{12}	–0,9203	0,1304	0,1679
X_{13}	0,9165	0,1693	–0,1949
X_{14}	0,514	0,0109	0,1687
X_{15}	–0,2684	0,0321	0,7174
X_{16}	0,0917	–0,8296	0,0575
X_{17}	–0,9188	0,0264	–0,1348
Собственные числа	5,1824	3,0681	2,1664
Процент объясняемой дисперсии	0,3048	0,1805	0,1274

Источник: составлено авторами.

В результате классификации угроз климатических изменений в изучаемой социоэколого-экономической системе нами были выделены три главные компоненты. Факторные нагрузки, полученные после вращения исходной матрицы факторных нагрузок методом *Bi-quartimax*, позволили перейти от стандартных показателей регионального развития к выявлению ключевых угроз климатического характера, анализ которых позволяет выделить направления структурной адаптации на основе итогов параметрической оценки признакового пространства.

4.2. Структурная адаптация подсистем региональной социоэколого-экономической системы к влиянию угроз климатических изменений и оценка их последствий

В рамках данного этапа нами было представлено обоснование одного из возможных вариантов применения адаптивного подхода в сочетании с имитационным при решении задачи адаптивного развития региональной социоэколого-экономической системы.

На основе синтеза параметрической и структурной адаптации были разработаны принципы построения адаптивно-имитационной модели, которые, в свою очередь, были использованы при разработке имитационной модели на базе многофакторной модели с настраиваемой структурой многошагового адаптивного механизма. С помощью подобных моделей удастся имитировать потенциально возможное состояние моделируемых объектов и последовательно оценивать соответствующие этим состояниям прогнозные траектории их развития.

Наличие адаптивного механизма в имитационных моделях позволяет учесть в перспективных расчетах не только изменение экзогенно действующих факторов, но и возможную дина-

мику структурных изменений в самих моделируемых объектах [36].

В нашем случае необходимо не просто учесть контролируемые и неконтролируемые факторы климатического характера, но и выделить предпосылки перехода системы в новое состояние. Таким образом основное назначение таких моделей — многовариантные прогнозные расчеты с учетом возможных изменений в характере действия эндогенных и экзогенных факторов.

Математическая постановка задачи для такого процесса моделирования была определена нами следующим образом. Пусть исследуется адаптивная модель, общий вид которой:

$$\hat{y}_i = x_i \hat{B}(t-1) \quad (5)$$

$$\hat{B}(t) = F[\hat{B}(t-1), x_i, y_i, \hat{y}_i, \gamma], \quad (6)$$

где F — некоторая функция, определяющая структурную адаптацию региональной социоэколого-экономической системы; $\hat{B}(t)$ — текущая оценка вектора коэффициентов адаптивной модели; x_i — вектор-строка значений независимых переменных в момент времени t ; y_i — значение зависимой переменной в момент t ; \hat{y}_i — прогнозные значения зависимой переменной, рассчитанные для момента t ; γ — параметр адаптации, настраиваемый в процессе обучения и учитывающий неопределенность влияния внешней среды (климатических факторов).

Среди алгоритмов, задающих адаптивный механизм, нами были рассмотрены только такие, которые позволяют вести вычисление текущих оценок коэффициентов модели путем корректировки их предшествующих значений на величину, зависящую от ошибки предсказания $e_i = y_i - \hat{y}_i$.

В общем виде формула пересчета текущих коэффициентов выглядит следующим образом:

$$\widehat{B}(t) = \widehat{B}(t-1) + V(x_t, \gamma, e_t). \quad (7)$$

В разработанной авторами стандартной модели алгоритма прогнозных расчетов возможно использование не одной, а двух случайных величин, получаемых с помощью статистического моделирования, имитирующих ошибки предсказания e_t и аппроксимации $\varepsilon_t = y_t - x_t \widehat{B}(t)$ (принцип проводимых таким образом расчетов приведен в виде укрупненной схемы в [37]).

Формально при таком подходе расчетное значение \widehat{y}_t можно считать реализацией некоторой случайной функции, учитывающей как внешние, так и внутренние воздействие на устойчивую динамику функционирования региональной социоэколого-экономической системы, которая была обозначена нами через $y(x_t, \widehat{B}(t-1), \gamma, \tilde{e}_t, \tilde{\varepsilon}_t)$.

Одним из наиболее вероятных вариантов прогнозной траектории развития региональной социоэколого-экономической системы, при условии, что случайные величины $\tilde{e}_t, \tilde{\varepsilon}_t$ моделировались согласно законам распределения, которым подчиняются фактические ошибки предсказания e_t и аппроксимация ε_t , являясь усредненный результат имитационных экспериментов.

Идентификация законов распределения этих случайных величин была осуществлена с помощью критериев согласия по выборочным наблюдениям показателей угроз климатических изменений. Необходимая для этого выборка случайных величин e_t и ε_t была получена в режиме обучения адаптивной модели.

Вычисление прогнозных значений в виде усредненной траектории развития региональной социоэколого-экономической системы была сведена к задаче оценивания математического ожидания случайной функции $y(x, B, \gamma, e, \varepsilon)$.

При известных значениях независимых переменных x_t , коэффициентов модели $B(t-1)$ и параметра γ оценивание математического ожидания $M[y]$ было сведено к вычислению с помощью метода Монте-Карло средних значений отклика модели:

$$\bar{y}_t = N^{-1} \sum_{i=1}^N y(x, \bar{B}(t-1), \gamma, \tilde{e}_{ij}, \tilde{\varepsilon}_{ij}), \quad (8)$$

для каждого $t = T+1, T+2, \dots, T+\tau$.

Далее в формализованном виде нами был разработан алгоритм работы рекурсивной адаптивно-имитационной модели.

В рассмотрение была введена индикаторная переменная

$$\bar{\omega}_{t+li} = \begin{cases} 0, & 5A: \delta \widehat{y}_{t+li} < \bar{y}_{t+1} \\ 1, & 5A: \delta \widehat{y}_{t+li} \geq \bar{y}_{t+1} \end{cases}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (9)$$

где \widehat{y}_{t+li} — результат i -го имитационного эксперимента, \bar{y}_{t+1} — нормативное значение любого управленческого регулятора.

Соответственно, прогноз устойчивой траектории развития региональной социоэколого-экономической системы рассчитывается по формуле:

$$\widehat{p}_{t+1} = N^{-1} \sum_{i=1}^N \bar{\omega}_{t+li}. \quad (10)$$

При этом важным моментом в процедуре определения адаптивной траектории развития является процесс имитации траекторий потенциально возможных результатов или прогнозов основных показателей климатических изменений.

Адаптивно-имитационную модель оценки уровня развития региональной социоэколого-экономической системы, построенную на базе многофакторного с настраиваемой структурой многошагового адаптивного механизма, можно описать с помощью приведенного ниже набора параметров, переменных

и рекуррентных формул базового алгоритма.

Так, оцениваемые параметры:

$\widehat{B}(t) = (\widehat{b}_{1t}, \widehat{b}_{2t}, \dots, \widehat{b}_{mt})$ — усредненное текущее значение вектора коэффициентов многофакторной адаптивной модели;

$\widehat{B}_i(t) = (\widehat{b}_{1t}^i, \widehat{b}_{2t}^i, \dots, \widehat{b}_{mt}^i)$ — текущее значение вектора коэффициентов, используемых для расчета отклика адаптивной модели в i -м эксперименте;

m_e, s_e — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение ошибки предсказания;

$m_\varepsilon, s_\varepsilon$ — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение ошибки аппроксимации.

Настраиваемые параметры:

α, β, γ — параметры адаптивного механизма многофакторной модели ($0 < \alpha \leq 1, 0 \leq \gamma, \beta \leq 1, \gamma + \beta \leq 1$);

n — параметр, определяющий порядок многошаговости адаптивного механизма (n — целое).

Случайные величины:

$E'_{n-lt} = (\varepsilon_{t-n+2}, \varepsilon_{t-n+3}, \dots, \varepsilon_t)$ — вектор ошибки аппроксимации, характеризующий уровень рассогласованности модели с реально протекающим процессом на отрезке из $(n - 1)$ наблюдения;

$\tilde{\varepsilon}_{ii}$ — случайная величина с известным законом распределения, имитирующая в i -м эксперименте ошибку предсказания адаптивной модели в момент t ;

$\tilde{\varepsilon}_{ii}$ — случайная величина с известным законом распределения, имитирующая в i -м эксперименте ошибку аппроксимации адаптивной модели в момент.

Процедуры моделирования случайных величин:

F — процедура моделирования псевдослучайных чисел, имитирующих ошибку предсказания;

Ψ — процедура моделирования псевдослучайных чисел, имитирующих ошибку аппроксимации.

Экзогенные переменные:

$x_t = (x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{mt})$ — вектор-строка значений независимых переменных в момент t ;

$X_{nt} = (x_{t-n+1}, x_{t-n+2}, \dots, x_t)'$ — матрица из вектор-строк независимых переменных.

Эндогенные переменные и величины:

$Y_{n-lt} = (y_{t-n+2}, y_{t-n+3}, \dots, y_t)$ — вектор-столбец из $(n - 1)$ фактического значения зависимой переменной;

$\widehat{Y}_{n-lt} = (\widehat{y}_{t-n+2}, \widehat{y}_{t-n+3}, \dots, \widehat{y}_t)$ — вектор-столбец из $(n - 1)$ расчетного значения зависимой переменной;

\widehat{y}_{t+li} — вариант прогнозного значения зависимой переменной, полученный как результат i -го имитационного эксперимента;

\widehat{y}_{t+1} — прогнозное значение зависимой переменной, усредненное по серии из N имитационных экспериментов.

Прочие обозначения:

P — обратная матрица размера $(n \times n)$, используемая в вычислительной схеме адаптивного механизма;

C_t^{-1} — матрица, обратная матрице соответствующей системы нормальных уравнений.

Соответственно, вычислительная схема для адаптивного механизма многофакторной модели может быть представлена следующим образом:

$$\widehat{Y}_{n-lt} = X_{n-lt} \widehat{B}(t); \quad (11)$$

$$E_{n-lt} = Y_{n-lt} - \widehat{Y}_{n-lt}; \quad (12)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{t+li} = F(m_e, s_e); \quad (13)$$

$$\tilde{E}_{n+1}^i = (E'_{n-lt}; \tilde{\varepsilon}_{t+li})'; \quad (14)$$

$$P_{t+1} = (X_{nt} C_t^{-1} X'_{nt} + \alpha I)^{-1}; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \widehat{B}_i(t+1) &= \widehat{B}_i(t) + \\ &+ \beta [\widehat{B}_i(t) - \widehat{B}_i(t-1)] + \\ &+ (1 - \gamma - \beta) C_t^{-1} X_{n+1} P_{t+1} \tilde{E}_{n+1}^i; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{t+1i} = \Psi(m_\varepsilon, s_\varepsilon); \quad (17)$$

$$\hat{y}_{t+1i} = x_{t+1} \hat{B}_i(t+1) + \tilde{\varepsilon}_{t+1i}; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \hat{p}_{t+1} = \\ & = N^{-1} \sum_{i=1}^N \text{sign}(\text{sign}(\hat{y}_{t+1i} - \bar{y}_{t+1}) + 1); \end{aligned} \quad (19)$$

$$\hat{B}(t+1) = N^{-1} \sum_{i=1}^N \hat{B}_i(t+1); \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & C_{t+1}^{-1} = \\ & = \frac{1}{\alpha} [C_t^{-1} - C_t^{-1} X_{nt+1} P_{t-1} X_{nt+1} C_{t-1}^{-1}]. \end{aligned} \quad (21)$$

Полученную с помощью такой модели оценку риска \hat{p}_{t+1} будем называть прогнозной, так как она рассчитывается с помощью прогнозных значений. Применимость данной математической модели также связана с задачей формирования группы показателей, характеризующих уровень последствий климатических изменений для зависимости вида:

$$Y_m = f(U_c; R_p \rightarrow R_p^*; \varepsilon) \quad (22)$$

$$Z_n = f(Y_m; R_p^*; M_s) \quad (23)$$

с определенным уровнем точности по [38].

Исходя из указанного, комплексная задача моделирования влияния климатических угроз на подсистемы региональной социоэколого-экономической системы была трансформирована в задачу синтеза на основе применения адаптивного, имитационного и системно-динамического подходов. Эти подходы позволяют с помощью рекурсивной адаптивно-имитационной системно-динамической модели определять такую траекторию развития региональной социоэколого-экономической системы, которая в динамике учитывает степень влияния климатических изменений. Также они позволяют определять струк-

турные системно-динамические свойства последствий воздействий климатического ландшафта на уровень развития экосистемы территории, ее отраслей, качество жизни населения и инфраструктуру (рис. 4).

Для представленной схемы адаптивно-имитационного моделирования система, формализуемая на основе метода системной динамики, была представлена на следующем образом:

$$\begin{aligned} & Lev_i U_j(\tau) = \\ & = \int_{t_0}^t (U_{ij}^+(\tau) - U_{ij}^-(\tau)) d\tau + Lev_i U_j(t_0) \end{aligned} \quad (24)$$

$$t = \overline{t_0, t_k}, \quad (25)$$

где $Lev_i U_j(t_0)$ — начальное значение уровней климатических изменений для i -подсистем региональной социоэколого-экономической системы;

$Lev_i U_j$ — уровни накопителя положительных и отрицательных эффектов для j -климатических угроз, которые являются результатом притоков и оттоков ресурсов для i -подсистем региональной социоэколого-экономической системы; под влиянием j -климатических угроз, которые рассматриваются как непрерывные переменные величины, определяющие результат, т. е. последствия климатических изменений в системе;

$U_{ij}^{+/-}(\tau)$ — темпы увеличения/уменьшения ресурсов с учетом параметров адаптации для i -подсистем региональной социоэколого-экономической системы;

t_0 — начальный момент моделирования;

t_k — конечный момент моделирования.

Для проведения экспериментов обязательным условиям синтеза параметров модели являлось включение значений адаптивных коэффициентов,

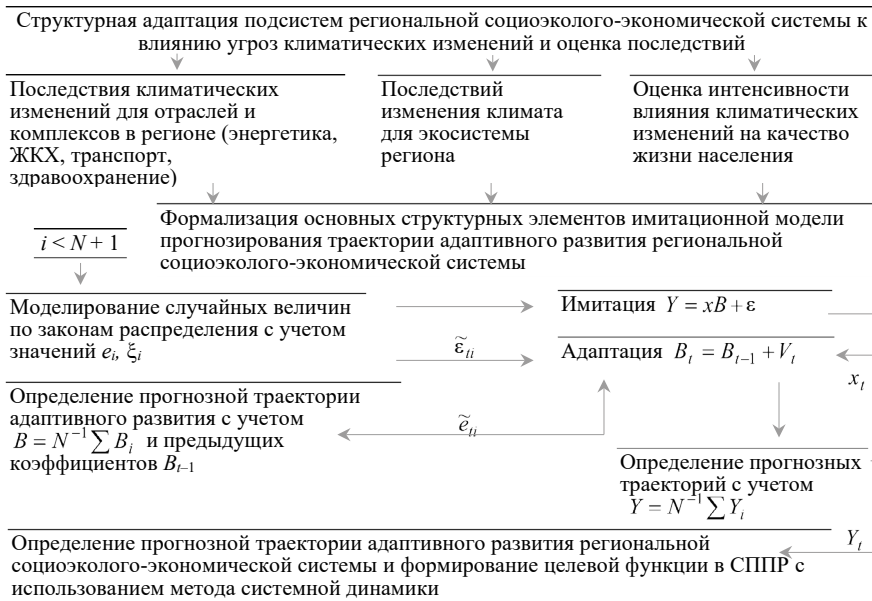


Рис. 4. Концептуальная схема адаптивно-имитационного моделирования траектории развития региональной социоэколого-экономической системы под влиянием климатических изменений

Figure 4. Conceptual scheme of adaptive simulation modeling of the trajectory of development of the regional socio-ecological-economic system under the influence of climate change

Источник: составлено авторами.

которые проверяются в ходе реализации имитационных экспериментов и как следствие являются параметром структурной адаптации B_t снижающим ошибку прогнозирования параметрической адаптации $R_p \rightarrow R_p^*$ в динамике.

Таким образом, в общем виде включение в модель мероприятий, направленных на обеспечение адаптации регионов и секторов экономики к климатическим изменениям, можно записать в виде:

$$M_s = f(B_t; U_c; R_p \rightarrow R_p^*) = f(\gamma_1; \gamma_2; \gamma_3), \tag{26}$$

где M_s — комплекс мероприятий по снижению негативных последствий климатических изменений на адаптивное развитие региональной социоэколого-экономической системы;

B_t — параметр структурной адаптации;

$\gamma_1; \gamma_2; \gamma_3$ — мероприятия по снижению негативных последствий влияния климатических изменений на социум, экосистему и экономику региона.

Формирование анализируемого комплекса адаптационных мероприятий опиралось на принципы комплексности учета факторов климатического воздействия на атмосферу, гидросферу и литосферу и криосферу; этапности их реализации с целью сокращения негативных последствий, проявляющихся в сферах жизнедеятельности населения, экосистем и отраслей экономики, а также их взаимосвязку. При этом за основу были взяты 50 адаптационных мероприятий Регионального плана адаптации к из-

менениям климата¹ и 12 адаптационных мероприятий Плана мероприятий².

5. Обсуждение результатов

Основными результатами выполненного исследования стали модель реализации сценариев и прогнозирования последствий глобального изменения климата для региональных социоэколого-экономических систем и ее апробация на оценке последствий северных регионов Западной Сибири.

По существу, это пионерное исследование, так как разрабатываемые отраслевые и региональные планы адаптации опираются не на глубокий анализ прогнозируемых последствий изменения климата, а на балльные оценки экспертов, большая часть которых, как правило, представители органов власти конкретного субъекта Федерации.

Как показывает практика, сегодня достаточно сложно установить взаимосвязь между прогнозируемым изменением климата, с одной стороны, и последствиями, возникающими в сфере уровня жизни населения, экологии и отдельных секторов экономики:

во-первых, в связи с их косвенным (опосредованным) характером;

во-вторых, значительной удаленностью по времени (длительным временным лагом);

в-третьих, практикой разработки прогнозов для крупных регионов;

в-четвертых, сложностью прогнозирования чрезвычайных природных явлений, таких как наводнения, ураганы и др.

Поэтому большинство исследователей ограничиваются климатическими прогнозами, либо оценкой ущербов уже свершившихся последствий. В качестве примеров здесь можно привести периодические оценочные доклады об изменениях климата и их последствиях на территории РФ Росгидромета, Межправительственной группы экспертов по изменению климата, Института глобального климата и экологии Росгидромета исследования, а также оценки и прогнозы Института народнохозяйственного прогнозирования РАН, ИНИОН РАН и других организаций.

Следует отметить, что оценка влияния изменения климата на население и отрасли экономики носят преимущественно экспертный, качественный характер. В то же время мировая практика построения моделей прогнозирования социальных, экономических и экологических последствий в регионах Юго-Восточной Азии, Южной Америки, европейских стран опирается на использование статистических методов, которые, однако, как было выше отмечено, не учитывают нелинейный, сложный характер взаимосвязей прогнозируемых явлений.

В данном исследовании сделана одна из первых попыток построить модель сценариев адаптации социоэколого-экономических систем к глобальным изменениям климата. При этом она в большей степени носит концептуальный характер, подтверждая возможность решения этих задач с использованием моделей системной динамики. Перспективы ее дальнейшего использования связаны с расширением спектра учитываемых факторов и последствий, а также более точной калибровки.

Выполненное исследование показало, что разработанные модели, по-

¹ Региональный план адаптации к изменениям климата: утвержден Распоряжением правительства Ямало-Ненецкого автономного округа от 19 декабря 2022 года № 1281-РП.

² План мероприятий («дорожная карта») по снижению антропогенного воздействия на климат и адаптации к климатическим изменениям в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре на 2021–2030 годы: утвержден Постановлением правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры от 5 октября 2018 года № 352-п.

строенные на материалах конкретных регионов, не могут «механически» использоваться на материалах других регионов, так как требуют соответствующей корректировки и верификации.

Таким образом, выполненное исследование подтвердило выдвинутую гипотезу о возможности разработки и построения инструментальной численной модели, позволяющей на основе долговременных статистических данных моделировать сценарии адаптации разноуровневых (как глобальных, так и региональных) социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата.

Авторами обосновано преимущество используемого математического инструментария — моделей системной динамики перед статистическими методами, показана важность качественных региональных климатических прогнозов и необходимость учета широкого круга социальных, экологических и экономических факторов.

6. Заключение

В настоящее время прогнозирование последствий глобального изменения климата вышло за рамки ранее разрабатывавшихся климатических моделей и сформировало новую междисциплинарную область научного поиска, а именно разработку моделей адаптации социоэколого-экономических систем к динамично меняющимся условиям внешней среды.

Основываясь на комплексном методическом подходе, авторами:

во-первых, разработана аналитическая модель адаптивного развития региональной социоэколого-экономической системы;

во-вторых, обоснован перечень базовых предпосылок, оказывающих на нее (систему) ключевое влияние вследствие климатических изменений (ухудшение уровня экономического развития из-за сокращения объема инвестиций в основной капитал; снижение качества жизни населения, в результате ухудшения питания; угроза разрушения инфраструктуры по причине высокого уровня пожароопасности);

в-третьих, для дальнейшей апробации авторами предложена прогнозная модель устойчивой траектории развития региональной социоэколого-экономической системы в условиях глобального изменения климата.

Была подтверждена гипотеза о возможности разработки и построения инструментальной численной модели, позволяющей на основе долговременных статистических данных моделировать сценарии адаптации разноуровневых (как глобальных, так и региональных) социоэколого-экономических систем к последствиям глобального изменения климата.

Научная значимость исследования состоит в расширении научных знаний о подходах к моделированию сценариев адаптации социоэколого-экономических систем к глобальным изменениям климата.

Практическая значимость состоит в возможности использования результатов при разработке планов адаптации регионов России к изменениям климата, в том числе в сферах природопользования и хозяйственной деятельности; гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Список использованных источников

1. Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рэндерс Й., Беренс III В. Пределы роста. М.: Изд-во МГУ, 1991. 205 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001612368/

2. Yearbook of the United Nations. Vol. 41. New York: United Nations, Department of Public Information, 1987. 1431 p. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/143313?ln=en>
3. Yearbook of the United Nations. Vol. 42. New York: United Nations, Department of Public Information, 1988. 1091 p. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/232318?ln=en>
4. Радионов В. Ф., Александров Е. И., Алексеев Г. В., Иванов Н. Е. Климатический анализ гидрометеорологических параметров Северной полярной области и арктических морей России // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2014. № 41. С. 17–39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22568178>
5. Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., Григорьев М. Н. и др. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования: оценочный отчет. Greenpeace. М.: Совет Гринпис, 2010. 44 с. URL: <https://www.npo-fsa.ru/sites/default/files/kcfinder/files/izmeneniia.pdf>
6. Azevedo I., Horta I., Leal V. M. S. Analysis of the relationship between local climate change mitigation actions and greenhouse gas emissions — Empirical insights // Energy Policy. 2017. Vol. 111. Pp. 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.032>
7. Marzi S., Mysiak J., Santato S. Comparing adaptive capacity index across scales: The case of Italy // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 223. Pp. 1023–1036. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.060>
8. Kjellström E., Barring L., Nikulin G., Nilsson C., Persson G., Strandberg G. Production and use of regional climate model projections — A Swedish perspective on building climate services // Climate Services. 2016. Vol. 2–3. Pp. 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.06.004>
9. Anuakwa-Mensah F., Marbuah G., Mubanga M. Climate variability and infectious diseases nexus: Evidence from Sweden // Infectious Disease Modelling. 2017. Vol. 2, Issue 2. Pp. 203–217. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2017.03.003>
10. Thomson R. M., Furuya-Kanamori L., Coffey C., Bell S. C., Knibbs L. D., Lau C. L. Influence of climate variables on the rising incidence of nontuberculous mycobacterial (NTM) infections in Queensland, Australia 2001–2016 // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 740. 139796. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139796>
11. Zandvoort M., Campos I. S., Vizinho A., et al. Adaptation pathways in planning for uncertain climate change: Applications in Portugal, the Czech Republic and the Netherlands // Environmental Science and Policy. 2017. Vol. 78. Pp. 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.017>
12. Appleby-Arnolda S., Brockdorff N., Jakovljević I., Zdravković S. Applying cultural values to encourage disaster preparedness: Lessons from a low-hazard country // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2018. Vol. 31. Pp. 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.04.015>
13. Алексеев Г. В., Глок Н. И., Смирнов А. В., Вязилова А. Е. Влияние Северной Атлантики на колебания климата в районе Баренцева моря и их предсказуемость // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 38–56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26527014>
14. Лобанов В. А., Тоцакова Г. Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 79–89. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-3-79-89>
15. Смирнова Л. Г., Чендев Ю. Г., Кухарук Н. С., Нарожная А. Г., Кухарук С. А., Смирнов Г. В. Изменение почвенного покрова в связи с короткопериодическими климатическими колебаниями // Почвоведение. 2019. № 7. С. 773–780. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070116>
16. Пестерева Н. М., Сидоренко Н. Ю., Надеина О. С. Современные тенденции развития горнолыжных курортов в условиях изменения климата (на примере Западного Кавказа и Сихотэ-Алиня) // География и природные ресурсы. 2016. № 2. С. 85–93. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25993943>

17. Yigini Y., Panagos P. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe // *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 557–558. Pp. 838–850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.085>
18. Thom D., Taylor A. R., Seidl R., Thuiller W., Wang J., Robideau M., Keeton W. S. Forest structure, not climate, is the primary driver of functional diversity in northeastern North America // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 762. 143070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143070>
19. Cao L., Huo X., Xiang J., Lu L., Liu X., Song X., Jia C., Liu Q. Interactions and marginal effects of meteorological factors on haemorrhagic fever with renal syndrome in different climate zones: Evidence from 254 cities of China // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 721. 137564. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137564>
20. Theusme C., Avendano-Reyes L., Macías-Cruz U., Correa-Calderon A., Garcia-Cueto R. O., Mellado M., Vargas-Villamil L., Vicente-Perez A. Climate change vulnerability of confined livestock systems predicted using bioclimatic indexes in an arid region of México // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 751. 141779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141779>
21. Wang B., Deveson E. D., Waters C., Spessa A., Lawton D., Feng P., Liu De L. Future climate change likely to reduce the Australian plague locust (*Chortoicetes terminifera*) seasonal outbreaks // *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 668. Pp. 947–957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.439>
22. Zhou G., Zhu J., Luo S., Wu Z., Jiang Y. An evaluation method of fragile states index based on climate shock: A case of Bangladesh // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 275. 111142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111142>
23. Mishra A., Ghate R., Maharjan A., Gurung J., Pathak G., Upraity A. N. Building ex ante resilience of disaster-exposed mountain communities: Drawing insights from the Nepal earthquake recovery // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2017. Vol. 22. Pp. 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.03.008>
24. Gazol A., Camarero J. J. Compound climate events increase tree drought mortality across European forests // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 816. 151604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151604>
25. Manne A., Mendelson R., Richels R. MERGE — a Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG reduction policies // *Energy Policy*. 1995. Vol. 23, Issue 1. Pp. 17–34. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(95\)90763-W](https://doi.org/10.1016/0301-4215(95)90763-W)
26. Li W., Jiang R., Wu H., Xie J., Zhao Y., Song Y., Li F. A System Dynamics Model of Urban Rainstorm and Flood Resilience to Achieve the Sustainable Development Goals // *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 96. 104631. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104631>
27. Wang Z., Fu X. Scheme simulation and predictive analysis of water environment carrying capacity in Shanxi Province based on system dynamics and DPSIR model // *Ecological Indicators*. 2023. Vol. 154. 110862. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110862>
28. Vermeulen-Miltz E., Clifford-Holmes J. K., Scharler U. M., Lombard A. T. A system dynamics model to support marine spatial planning in Algoa Bay, South Africa // *Environmental Modelling & Software*. 2023. Vol. 160. 105601. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105601>
29. Wang X., Dong Z., Susnik J. System dynamics modelling to simulate regional water-energy-food nexus combined with the society-economy-environment system in Hunan Province, China // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 863. 160993. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160993>
30. Лычкина Н. Н. Динамическое имитационное моделирование развития социально-экономических систем и его применение в информационно-аналитических решениях для стратегического управления // *Стратегии бизнеса*. 2013. № 2 (2). С. 44–49. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2013-2-44-49>

31. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Комплексная системно-динамическая модель для управления региональной безопасностью // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4 (28). С. 26–40. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2019-4-3>
32. Шац М. М. Тематические базы эколого-геокриологической информации природно-техногенных комплексов севера РФ (общие положения и теория) // Климат и природа. 2017. № 2 (23). С. 13–28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29442329>
33. Алексеев Г. В., Радионов В. Ф., Александров Е. И., Иванов Н. Е., Харланенкова Н. Е. Климатические изменения в Арктике и Северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 1 (84). С. 67–80. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15101812>
34. Lobanov V. A. Empirical-Statistical Methodology and Methods for Modeling and Forecasting of Climate Variability of Different Temporal Scales // Advances in Atmospheric Sciences. 2001. Vol. 18. Pp. 844–863. <https://doi.org/10.1007/BF03403507>
35. Цаликов Р. Х. Изменения климата на Севере России: опасности и угрозы жизнедеятельности // Регион: Экономика и Социология. 2009. № 1. С. 158–166. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12609665>
36. Fazlollahi B., Parikh M. A., Verma S. Adaptive decision support systems // Decision Support Systems. 1997. Vol. 20, Issue 4. Pp. 297–315. [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(97\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(97)00014-6)
37. Badach A. Adaptive Models in Econometric Forecasting // IFAC Proceedings Volumes. 1980. Vol. 13, Issue 5. Pp. 271–277. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)64881-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)64881-X)
38. Warne A. DSGE Model Forecasting: Rational Expectations vs. Adaptive Learning // ECB Working Paper. No. 2023/2768. European Central Bank, 2023. 60 p. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4338207>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гончарова Ксения Сергеевна

Кандидат экономических наук, научный сотрудник высшей школы цифровой экономики Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск, Россия (628012, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16); ORCID <http://orcid.org/0000-0003-2381-3322> e-mail: ksenia.gon4arowa@gmail.com

Загорная Татьяна Олеговна

Доктор экономических наук, заведующая кафедрой бизнес-информатики Донецкого государственного университета, г. Донецк, Россия (283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24); ORCID <http://orcid.org/0000-0003-0097-9557> e-mail: t.zagornaya@donnu.ru

Коломытцева Анна Олеговна

Кандидат экономических наук, доцент кафедры бизнес-информатики Донецкого государственного университета, г. Донецк, Россия (283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24); ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2797-5487> e-mail: a.o.kolomytseva@urfu.ru

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 22-28-01403 «Модели прогнозирования процессов адаптации социоэколого-экономических систем северного региона к последствиям глобального изменения климата».





ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Гончарова К. С., Загорная Т. О., Коломыцева А. О. Моделирование сценариев адаптации региональных социэколого-экономических систем к глобальным изменениям климата // Journal of Applied Economic Research. 2023. Т. 22, № 4. С. 1006–1033. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.4.039>

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Дата поступления 25 сентября 2023 г.; дата поступления после рецензирования 15 октября 2023 г.; дата принятия к печати 8 ноября 2023 г.

Modeling Scenarios of Adaptation of Regional Socio-Ecological and Economic Systems to Global Climate Change

Kseniya S. Goncharova¹  , Tatiana O. Zagornaya² , Anna O. Kolomytseva² 

¹ Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia

² Donetsk State University,
Donetsk, Russia

 ksenia.gon4arowa@gmail.com

Abstract. The relevance of the study is due to the fact that in recent decades a socio-economic development of the territories of states and regions has been significantly affected by global climate change. Due to changes in temperature, precipitation, solar radiation, etc. fires are occurring; individual ecosystems are being transformed, which in turn negatively affects the quality of life of the population as well as the development of industries and economic systems. All of the above, on the one hand, emphasizes the relevance of developing tools and models for assessing the consequences of such an impact, and, on the other hand, highlights the need to develop a special adaptive mechanism for managing the socio-ecological and economic system, taking into account the impact of climate change. Accordingly, the aim of the work was to develop a model for the implementation of scenarios and forecasting the consequences of global climate change for regional socio-ecological and economic systems. To achieve this goal, the authors put forward a hypothesis about the possibility of developing and constructing an instrumental numerical model that allows, based on long-term statistical data, for modeling scenarios of adaptation of multi-level (both global and regional) socio-ecological and economic systems to the consequences of global climate change. To achieve this goal, a set of general scientific and economic-mathematical methods was used, mutually complementing each other, including methods of abstract-logical analysis, principal component analysis (PCA), methods of system dynamics, etc. The authors obtained the following results: firstly, an analytical model of adaptive development of the regional socio-ecological-economic system was developed; secondly, a list of basic prerequisites that have a fundamental impact on this system due to climate change was substantiated; thirdly, a forecast model was proposed of a stable trajectory of the development of a regional socio-ecological-economic system under the conditions of global climate change. The scientific significance of the study is to expand scientific knowledge about approaches to modeling scenarios for adaptation of socio-ecological-economic systems to global climate change. The practical significance of the work consists in the possibility of using the results for the development and improvement of plans for the adaptation of Russia's regions to climate change, including in the areas of environmental management and economic activity, civil defense, protection of the population and territories from natural and man-made emergencies.

Key words: forecasting of consequences; models; socio-ecological and economic systems; quality of life; environment; vulnerability; global climate change; region; adaptation.

JEL Q54; O21; C38

References

1. Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens III V. (1991). *The Limits to Growth*. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 205 p. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001612368/

2. *Yearbook of the United Nations*. (1987). Vol. 41. New York, United Nations, Department of Public Information, 1987. 1431 p. Available at: <https://digitallibrary.un.org/record/143313?ln=en>
3. *Yearbook of the United Nations*. (1988). Vol. 42. New York: United Nations, Department of Public Information, 1091 p. Available at: <https://digitallibrary.un.org/record/232318?ln=en>
4. Rodionov, V.F., Alexandrov, E.I., Alekseev, G.V., Ivanov, N.E. (2014). Climatic analysis of hydrometeorological parameters of the Northern Polar region and the Arctic seas of Russia. *Results of Testing of New and Improved Technologies, Models and Methods of Hydrometeorological Forecasts*, No. 41, 17–39. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22568178>
5. Anisimov, O.A., Belolutskaya, M.A., Grigoriev, M.N. et al. (2010). *Main Natural and Socio-Economic Consequences of Climate Change in Permafrost Areas: Forecast Based on a Synthesis of Observations and Modeling: Assessment Report*. Greenpeace. Moscow, Greenpeace Council, 44 p. (In Russ.). Available at: <https://www.npo-fsa.ru/sites/default/files/kcfinder/files/izmeneniia.pdf>
6. Azevedo, I., Horta, I., Leal, V.M.S. (2017). Analysis of the relationship between local climate change mitigation actions and greenhouse gas emissions — Empirical insights. *Energy Policy*, Vol. 111, 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.032>
7. Marzi, S., Mysiak, J., Santato, S. (2018). Comparing adaptive capacity index across scales: The case of Italy. *Journal of Environmental Management*, Vol. 223, 1023–1036. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.060>
8. Kjellström, E., Barring, L., Nikulin, G., Nilsson, C., Persson, G., Strandberg, G. (2016). Production and use of regional climate model projections — A Swedish perspective on building climate services. *Climate Services*, Vol. 2–3, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.06.004>
9. Amuakwa-Mensah, F., Marbuah, G., Mubanga, M. (2017). Climate variability and infectious diseases nexus: Evidence from Sweden. *Infectious Disease Modelling*, Vol. 2, Issue 2, 203–217. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2017.03.003>
10. Thomson, R.M., Furuya-Kanamori, L., Coffey, C., Bell, S.C., Knibbs, L.D., Lau, C.L. (2020). Influence of climate variables on the rising incidence of nontuberculous mycobacterial (NTM) infections in Queensland, Australia 2001–2016. *Science of The Total Environment*, Vol. 740, 139796. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139796>
11. Zandvoort, M., Campos, I.S., Vizinho, A., et al. (2017). Adaptation pathways in planning for uncertain climate change: Applications in Portugal, the Czech Republic and the Netherlands. *Environmental Science and Policy*, Vol. 78, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.017>
12. Appleby-Arnolda, S., Brockdorff, N., Jakovljević, I., Zdravković, S. (2018). Applying cultural values to encourage disaster preparedness: Lessons from a low-hazard country. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 31, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.04.015>
13. Alekseev, G.V., Glok, N.I., Smirnov, A.V., Vyazilova, A.E. (2016). The Influence of the North Atlantic on Climate Variations in the Barents Sea and Their Predictability. *Meteorology and Hydrology*, No. 8, 38–56. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26527014>
14. Lobanov, V.A., Toschakova, G.G. (2016). Features and causes of the modern climate change in Russia. *Geographical Bulletin*, No. 3, 79–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-3-79-89>
15. Smirnova, L.G., Chendev, Y.G., Kukharchuk, N.S., Narozhnaya, A.G., Kukharuk, S.A., Smirnov, G.V. (2019). Changes in soil Cover Due to Short-Period Climatic Variations. *Eurasian Soil Science*, No. 7, 773–780. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070116>
16. Pestereva, N.M., Sidorenko, N.Yu., Nadeina, O.S. (2016). Current development tendencies of mountain ski resorts under climate change (exemplified by the Western Caucasus and Sikhotealin). *Geography and Natural Resources*, No. 2, 85–93. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25993943>
17. Yigini, Y., Panagos, P. (2016). Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. *Science of The Total Environment*, Vol. 557–558, 838–850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.085>
18. Thom, D., Taylor, A.R., Seidl, R., Thuiller, W., Wang, J., Robideau, M., Keeton, W.S. (2021). Forest structure, not climate, is the primary driver of functional diversity in northeast-

ern North America. *Science of The Total Environment*, Vol. 762, 143070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143070>

19. Cao, L., Huo, X., Xiang, J., Lu, L., Liu, X., Song, X., Jia, C., Liu, Q. (2020). Interactions and marginal effects of meteorological factors on haemorrhagic fever with renal syndrome in different climate zones: Evidence from 254 cities of China. *Science of The Total Environment*, Vol. 721, 137564. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137564>

20. Theusme, C., Avendano-Reyes, L., Macías-Cruz, U., Correa-Calderon, A., Garcia-Cueto, R.O., Mellado, M., Vargas-Villamil, L., Vicente-Perez, A. (2021). Climate change vulnerability of confined livestock systems predicted using bioclimatic indexes in an arid region of México. *Science of The Total Environment*, Vol. 751, 141779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141779>

21. Wang, B., Deveson, E.D., Waters, C., Spessa, A., Lawton, D., Feng, P., Liu, DeL. (2019). Future climate change likely to reduce the Australian plague locust (*Chortoicetes terminifera*) seasonal outbreaks. *Science of The Total Environment*, Vol. 668, 947–957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.439>

22. Zhou, G., Zhu, J., Luo, S., Wu, Z., Jiang, Y. (2020). An evaluation method of fragile states index based on climate shock: A case of Bangladesh. *Journal of Environmental Management*, Vol. 275, 111142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111142>

23. Mishra, A., Ghate, R., Maharjan, A., Gurung, J., Pathak, G., Upraity, A.N. (2017). Building ex ante resilience of disaster-exposed mountain communities: Drawing insights from the Nepal earthquake recovery. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 22, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.03.008>

24. Gazol, A., Camarero, J.J. (2022). Compound climate events increase tree drought mortality across European forests. *Science of The Total Environment*, Vol. 816, 151604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151604>

25. Manne, A., Mendelson, R., Richels, R. (1995). MERGE — a Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG reduction policies. *Energy Policy*, Vol. 23, Issue 1, 17–34. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(95\)90763-W](https://doi.org/10.1016/0301-4215(95)90763-W)

26. Li, W., Jiang, R., Wu, H., Xie, J., Zhao, Y., Song, Y., Li, F. (2023). A System Dynamics Model of Urban Rainstorm and Flood Resilience to Achieve the Sustainable Development Goals. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 96, 104631. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104631>

27. Wang, Z., Fu, X. (2023). Scheme simulation and predictive analysis of water environment carrying capacity in Shanxi Province based on system dynamics and DPSIR model. *Ecological Indicators*, Vol. 154, 110862. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110862>

28. Vermeulen-Miltz, E., Clifford-Holmes, J.K., Scharler, U.M., Lombard, A.T. (2023). A system dynamics model to support marine spatial planning in Algoa Bay, South Africa. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 160, 105601. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105601>

29. Wang, X., Dong, Z., Susnik, J. (2023). System dynamics modelling to simulate regional water-energy-food nexus combined with the society-economy-environment system in Hunan Province, China. *Science of The Total Environment*, Vol. 863, 160993. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160993>

30. Lychkina, N.N. (2013). Dynamic simulation of socio-economic systems and its application in the information-analytical solutions for the strategic management. *Business Strategies*, No. 2, 44–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2013-2-44-49>

31. Masloboev, A.V., Putilov, V.A. (2019). A generic system-dynamic model for regional security control. *Reliability & Quality of Complex Systems*, No. 4, 26–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2019-4-3>

32. Shatz, M.M. (2017). Thematic base of ecological and geocryological information of natural and technological complexes of the north of the Russian Federation (general provisions and theory). *Climate & Nature*, No. 2, 13–28. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29442329>

33. Alekseev, G.V., Radionov, V.F., Aleksandrov, E.I., Ivanov, N.E., Kharlanenkova, N.E. (2010). Climate change in the Arctic and the Northern Polar region) *Arctic and Antarctic Research*, No. 1, 67–80. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15101812>

34. Lobanov, V.A. (2001). Empirical-Statistical Methodology and Methods for Modeling and Forecasting of Climate Variability of Different Temporal Scales. *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 18, 844–863. <https://doi.org/10.1007/BF03403507>
35. Calikov, R.H. (2009) Climate change in the North of Russia: dangers and threats to life. *Region: Economics and Sociology*, No. 1, 158–166. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12609665>
36. Fazlollahi, B., Parikh, M.A., Verma, S. (1997). Adaptive decision support systems. *Decision Support Systems*, Vol. 20, Issue 4, 297–315. [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(97\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(97)00014-6)
37. Badach, A. (1980). Adaptive Models in Econometric Forecasting. *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 13, Issue 5, 271–277. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)64881-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)64881-X)
38. Warne, A. (2023). DSGE Model Forecasting: Rational Expectations vs. Adaptive Learning. *ECB Working Paper*, No. 2023/2768. European Central Bank, 60 p. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4338207>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Kseniya Sergeevna Goncharova

Candidate of Economic Sciences, Researcher, Higher School of Digital Economics, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia (628012, Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra, Khanty-Mansiysk, Chekhova street, 16); ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2381-3322> e-mail: ksenia.gon4arowa@gmail.com

Tatiana Olegovna Zagornaya

Doctor of Economics, Head of Business Informatics Department, Donetsk State University, Donetsk, Russia (283001, Donetsk, Universitetskaya street, 24); ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0097-9557> e-mail: t.zagornaya@donnu.ru

Anna Olegovna Kolomytseva

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Business Informatics Department, Donetsk State University, Donetsk, Russia (283001, Donetsk, Universitetskaya street, 24); ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2797-5487> e-mail: a.o.kolomytseva@urfu.ru

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported by the grant the Russian Science Foundation, RSF 22-28-01403 «Forecasting the social, economic and environmental consequences of the Northern region's adaptation to the effects of global climate change».

FOR CITATION

Goncharova, K.S., Zagornaya, T.O., Kolomytseva, A.O. (2023). Modeling Scenarios of Adaptation of Regional Socio-Ecological and Economic Systems to Global Climate Change. *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 22, No. 4, 1006–1033. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.4.039>

ARTICLE INFO

Received September 25, 2023; Revised October 15, 2023; Accepted November 8, 2023.

