

Научная статья

Original article

УДК 338.431.7 + 502.3

DOI 10.55186/25876740_2023_7_5_4

**ОЦЕНКА СВОЙСТВ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРАТЕГИЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ
АДАПТАЦИИ АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ
АГРЕГИРОВАННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

**EVALUATION OF THE PROPERTIES OF OPTIMAL STRATEGIES FOR
CLIMATE ADAPTATION OF AGROFOOD SYSTEMS USING AN AGGREGATED
DYNAMIC MODEL**



Сиптиц Станислав Оттович, доктор экономических наук, руководитель отдела системных исследований экономических проблем АПК филиала «Всероссийский институт аграрных проблем и информатики им. А.А.Никонова» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий - Всероссийский научно исследовательский институт экономики сельского хозяйства» (105064, Москва, Большой Харитоньевский пер., д. 21/6, стр.1), тел. 8(495) 628-59-42, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2587-2350>, ssiptits@viapi.ru

Siptits O. Stanislav, doctor of economic sciences, head of the department of system studies of the economic problems of the agroindustrial complex of the All-Russian institute of agrarian problems and informatics named after A. A. Nikonov - branch of the Federal state budget scientific institution "Federal scientific center for Agrarian economics and social development of rural territories - All-Russian research institute of

agricultural economics" (105064, Moscow, Bolshoy Kharitonievsky per., 21/6, p. 1), tel. 8 (495) 623-14-10, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2587-2350>, ssiptits@viapi.ru

Аннотация. Продовольственная безопасность человечества всецело зависит от возможностей агропродовольственной системой нашей планеты, которые находятся под влиянием негативных изменений климата. Субъекты агропродовольственной системы вынуждены адаптироваться к этим изменениям. При этом полностью компенсировать негативную динамику климата не всегда возможно без привлечения целевых средств государственной поддержки. Возникает сложная системная задача по выработке сочетающихся и дополняемых друг друга стратегий, как на уровне производителя, так и на уровне государственного регулирования процессов климатической адаптации. Для этих целей необходимо разработать адекватный проблеме экономико-математический инструментарий, описывающий взаимосвязи в системе «климат–агропродовольственная система–государственные регуляторы». В данной работе представлен один из подходов, способствующих лучшему пониманию этих взаимодействий с помощью аппарата экономико-математического моделирования. Стратегии адаптации к изменяющемуся климату тесно связаны с возможностями агропродовольственных систем выделять часть валового продукта на совершенствование технологического базиса, реализацию специальных технологий, лимитирующих негативные климатические эффекты. В задачи государственного регулятора входит финансирование инфраструктурных проектов, а также частичная поддержка адаптивных мероприятий агропродовольственных систем. Таким образом, возникают два контура управления и задача оптимального распределения ресурсов, результаты решения которой находятся в зависимости от остроты климатического фактора. Данная модель разработана в рамках концепции системной динамики, то есть дает возможность описать поведение сложной системы с достаточно высокой степенью абстрагирования от частных деталей. Такие модели предназначены для

изучения качественной картины эволюции сложной системы под влиянием управляющих воздействий стратегического уровня и внешних возмущений. Исследование предлагает краткое описание агрегированной модели, интересные результаты расчетов, а также перспективы ее использования для оценки мер по низко углеродной трансформации агропродовольственных систем.

Abstract. The food security of mankind depends entirely on the capabilities of the agro-food system of our planet, which are influenced by negative climate change. The subjects of the agro-food system are forced to adapt to these changes. At the same time, it is not always possible to fully compensate for the negative climate dynamics without attracting targeted state support funds. A complex systemic task arises to develop strategies that combine and complement each other, both at the level of the manufacturer and at the level of state regulation of climate adaptation processes. For these purposes, it is necessary to develop an economic and mathematical toolkit adequate to the problem that describes the relationship in the system "climate–agri-food system–state regulators". This paper presents one of the approaches that contribute to a better understanding of these interactions using the apparatus of economic and mathematical modeling. Adaptation strategies to a changing climate are closely related to the ability of agro-food systems to allocate part of the gross product for improving the technological basis, the implementation of special technologies that limit negative climate effects. The tasks of the state regulator include financing infrastructure projects, as well as partial support for adaptive measures of agri-food systems. Thus, there are two control loops and the problem of optimal distribution of resources, the results of which depend on the severity of the climatic factor. This model was developed within the framework of the concept of system dynamics, that is, it makes it possible to describe the behavior of a complex system with a sufficiently high degree of abstraction from particulars. Such models are designed to study a qualitative picture of the evolution of a complex system under the influence of strategic level control actions and external disturbances. The study offers a brief description of the aggregated model, interesting results of the calculations, as well as the prospects for using it to assess measures for the low-carbon transformation of agri-food systems.

Ключевые слова: *моделирование, изменение климата, прогнозирование, низкоуглеродная трансформация, агропродовольственные системы, сценарии.*

Keywords: *modeling, climate change, forecasting, low carbon transformation, agro-food systems, scenarios.*

Введение. На нашей планете изменение климата стало одной из важнейших проблем, от которой зависит дальнейшее существование человечества. На мировую агропродовольственную систему (далее – АПС) приходится около одной трети глобальной эмиссии парниковых газов (далее – ЭПГ), а 50% пригодных для жизни земель (свободных ото льда и пустынь) используются для сельского хозяйства [1]. Землепользование и изменения в землепользовании связаны с четвертью глобальных выбросов парниковых газов в основном в результате вырубки тропических лесов, выбросов метана от животноводства и выращивания риса, выбросов закиси азота от удобренных почв и использования навоза [1]. Таким образом, адаптация АПС к изменению климата может способствовать росту ЭПГ, которая приведет к ускорению процессов глобального потепления, но также она необходима для обеспечения продовольствием растущего населения планеты, но в то же время трансформационные процессы в АПС могут приводить к снижению и не снижать параметры продовольственной обеспеченности человечества.

Механизмы адаптации бывают прямыми, то есть реакцией на климатические условия в данном месте, и косвенными, например, реакцией на изменения рыночных условий или административные меры регулирования, вызванные изменениями окружающей среды. Адаптация АПС к изменению климата включает изменение методов ведения сельского хозяйства (например, выбора других сельскохозяйственных культур или их сортов, технологий выращивания, интенсивности производства или его размещения и т.п.). И эта адаптация может сопровождаться смягчением изменения климата за счет сокращения ЭПГ. Моделирование альтернативных сценариев будущего и оценка

их результатов могут помочь в выборе адаптационных и трансформационных мер регулирования.

Мировая практика изобилует экономико-математическими моделями, которые позволяют оценивать комплексное влияние климатических изменений на аграрный сектор экономики, как было показано в обзорах [2-4]. Как правило, в основе этих конструкций лежат довольно сложные модели, описывающие совокупность биофизических процессов, таких как перенос тепла и влаги, фотосинтез, дыхание культивируемых растений и собственно производственный процесс. Экономическая часть представлена пространственными динамическими моделями частичного равновесия с возможностью регулирования землепользования, перераспределения земельных ресурсов между сельским и лесным хозяйством [5-7].

В подавляющем большинстве случаев, модели используются в режиме «что будет, если» как инструмент для оценки планируемых вариантов аграрной (и не только!) политики. Задача оптимального управления процессами адаптации агропродовольственных систем к климатической динамике, заканчивающаяся синтезом регуляторов не решается из-за слишком сложных модельных конструкций. Необходимость отражения сложных прямых и обратных воздействий и структурных связей в региональной АПС в схематичной форме представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 - Структура и взаимосвязи АПС, которые необходимо отразить в модели с целевым критерием оптимизации процесса низко углеродной трансформации АПС. Пунктиром показана информационная связь, характеризующая итерационный процесс поиска экстремальных значений функционала.

Источник: разработано автором.

Целью данной статьи будет представление разработанной в отделе системных исследований экономических проблем АПК ВИАПИ имени А.А. Никонова агрегированной вычислимой модели функционирования АПС,

реализующей ее отношения с природно-климатическим и экономическим окружением с последующим изучением модельных реакций на разные стратегии компенсаций негативных проявлений климата, а также развития технологического базиса в серии имитационных экспериментов.

Материалы и методы исследования. Итак, рассмотрим простую, агрегированную математическую модель, которая, тем не менее, сохраняет содержательность оценок влияния климатического фактора на развитие регионального сельского хозяйства. Она предназначена для анализа полноценной качественной картины влияния неблагоприятных изменений климата на сельское хозяйство, локализованное на некоторой территории, прежде всего, в регионе. Моделируются следующие зависимости, определяющие характер эволюции региональной АПС, рассматриваемые в многолетней исторической динамике (см. рис. 2):

– влияние климата на агроэкологический потенциал сельской территории с учетом мероприятий по противодействию негативным климатическим проявлениям,

– производство валовой продукции сельского хозяйства, лимитированное величиной агроэкологического потенциала, уровнем технологического развития и величиной инвестиций в механизмы адаптации сельского хозяйства к неблагоприятным климатическим изменениям,

– зависимость уровня технологического развития сельского хозяйства от доли валовой продукции сельского хозяйства, отчисляемой агропродовольственной системой (АПС) на эти цели,

– влияние средств государственной поддержки на динамику технологического развития и эффективность механизмов климатической адаптации АПС.



Рисунок 2 - Структурная схема агрегированной модели

Источник: разработано автором.

В соответствие со структурной схемой модели запишем систему из трех конечно-разностных уравнений следующего вида:

$$\bar{w}(t+1) = \bar{w}(t) \times (1 - \varepsilon) + u_1(t), \quad \bar{w}(0) = \bar{w}_0 \quad (1)$$

$$w(t+1) = w(t) \times \left\{ 1 + \theta(t) \times \left(1 - \frac{w(t)}{\bar{w}(t)} \right) \right\} - u_1(t) - u_2(t) + g_1(t), \quad w(0) = w_0, \quad (2)$$

$$\theta(t+1) = \theta(t) \times \left\{ 1 + k_0 \times (u_2(t) + g_2(t)) \times \left(1 - \frac{\theta(t)}{\theta} \right) \right\}, \quad \theta(0) = \theta_0, \quad (3)$$

где $w = w(t), t \in [0, T]$ – производство валовой продукции АПС в году t ,

T – интервал моделирования, лет,

$\bar{w} = \bar{w}(t)$ – предельный текущий уровень производства валовой продукции АПС, обусловленный состоянием климата и его влиянием на агроэкологический потенциал территории,

$\theta(t)$ – технологический мультипликатор,

$\bar{\theta}$ – предельный уровень технологического мультипликатора в рамках технологического уклада, действующего на $[0, T]$

k_0 – параметр, определяющий темпы роста технологического развития в зависимости от достигнутого уровня и вкладываемых ресурсов в технологическую базу,

ε – параметр, определяющий прогнозируемые темпы климатических изменений,

$u_1(t)$ – валовая продукция АПС, затрачиваемая ею на адаптивные мероприятия к меняющемуся климату, например, водные и/или агролесомелиорации,

$u_2(t)$ – валовая продукция АПС, затрачиваемая ею на технологическое развитие,

$g_1(t)$ – господдержка функционирования АПС в условиях меняющегося климата на частичную компенсацию негативных последствий,

$g_2(t)$ – господдержка технологического развития АПС.

Уравнение (1) моделирует изменение агроэкологического потенциала, обусловленное климатом, и влияние этого фактора на потенциальную продуктивность АПС. Скорость процесса определяется параметром ε , задаваемым как элемент сценария, и управлением $u_1(t)$ – частью валовой продукции АПС, направленной на противодействие негативным проявлением климата на данной территории.

Уравнения (2) и (3) представлены в форме логистической зависимости Ферхюльста и соответствуют следующей логике: процесс производства валовой продукции АПС в постоянных ценах ограничен ее предельным уровнем. При этом скорость роста валовой продукции зависит от уровня технологического развития,

который, в свою очередь, ограничен возможностями технологического уклада, а темпы роста связаны с объемами инвестиций.

Система уравнений (1) - (3) моделирует, таким образом, некий процесс, за которым стоят субъекты управления, реализующие стратегию климатической адаптации АПС. Иерархическая соподчиненность этих субъектов очевидна. Кроме этого предполагаем, что критерии эффективности стратегий адаптации у субъектов идентичны – максимизация производства дисконтированной валовой продукции АПС интервале $[0, T]$ лет за вычетом дисконтированной суммы господдержки. При этом все управляющие воздействия, то есть $u_1(t), u_2(t), g_1(t), g_2(t)$ будем считать неотрицательными величинами, ограниченными сверху константами, которые являются частью соответствующих сценариев; интегральные ограничения на управления отсутствуют.

Таким образом, мы пришли к задаче оптимального управления развитием АПС, находящейся под воздействием неблагоприятных климатических изменений.

Результаты и их обсуждение. Анализ решений этой задачи, выполненный численными методами, позволит ответить на ряд вопросов, среди которых, с нашей точки зрения, наибольший интерес представляет связь между остротой негативных климатических воздействий и характером адаптивных стратегий АПС, смягчающих эти эффекты.

Рассмотрим стратегии адаптации АПС к климатическим изменениям для двух сценариев. Первый можно характеризовать как сценарий со слабо выраженными негативными изменениями климата – сценарий «умеренно-негативный» сценарий. Во втором, «жестком» сценарии предусмотрены высокие скорости нарастания негативных климатических проявлений.

В численной реализации модели адаптации АПС были использованы следующие значения параметров: $\bar{w}_0=400$, $w_0=140$, $\theta_0=0,5$, $\bar{\theta}=1,2$, $\varepsilon=0,005$ (0,01), $k_0=0,07$. Управляющие воздействия: $u_1^{max} = 0,3$ (10), $u_2^{max}=0,7$, $g_1^{max} = 1$, $g_2^{max}=0,5$, $T=20$. В скобках даны значения параметров для «жесткого» сценария.

Оптимальные для каждого сценария стратегии адаптации находились с использованием прямых методов поиска экстремума.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты, соответствующие первому сценарию.

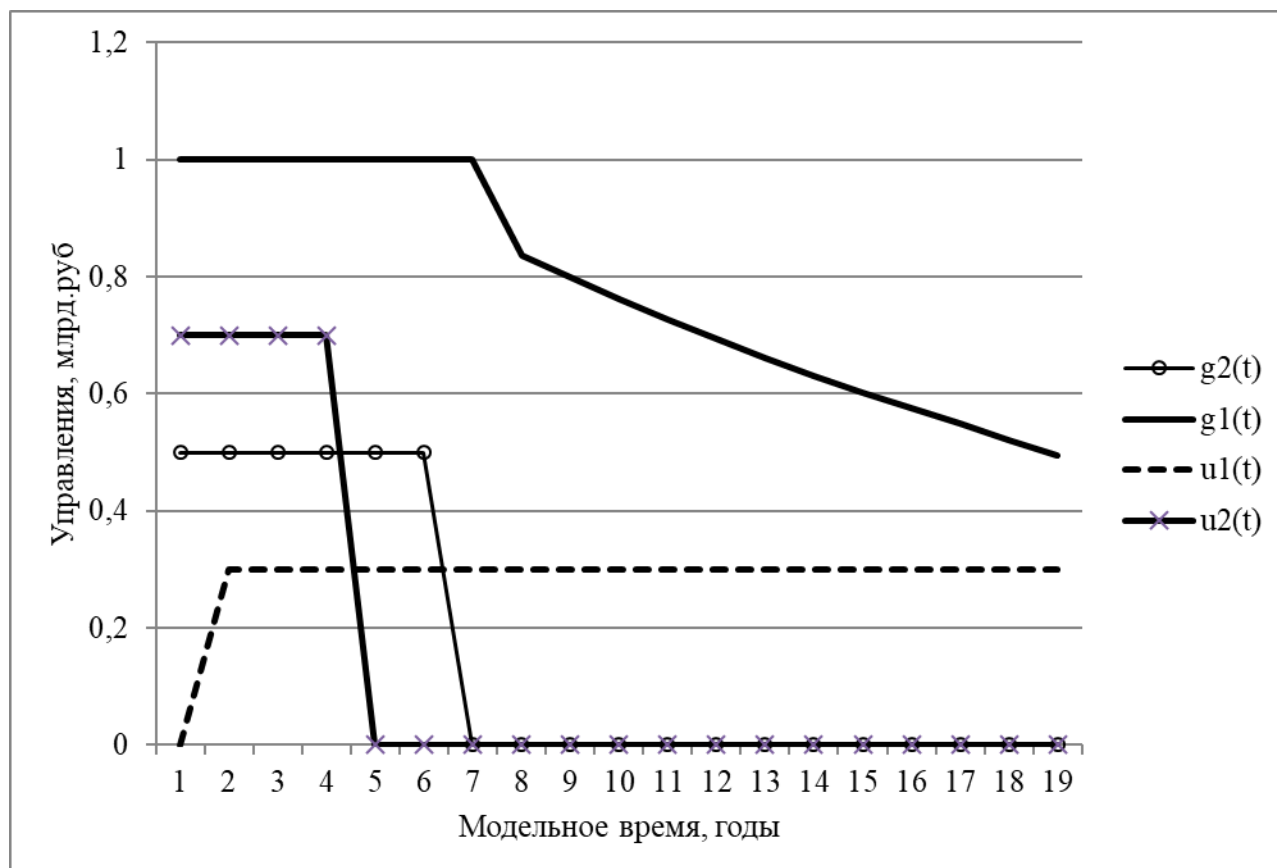


Рисунок 3 - Стратегия адаптации, соответствующая «умеренно-негативному» сценарию.

Источник: получено по результатам расчетов автора.

Можно заметить, что при выбранных ограничениях по амплитуде управлений затраты на компенсацию умеренно-негативных воздействий климата должны осуществляться постоянно, на всем интервале времени как самой АПС, так и выше стоящим регулятором. При этом затраты на технологическое развитие сосредоточены в течение первых 5 -7 лет у АПС, так и у госрегулятора, соответственно.

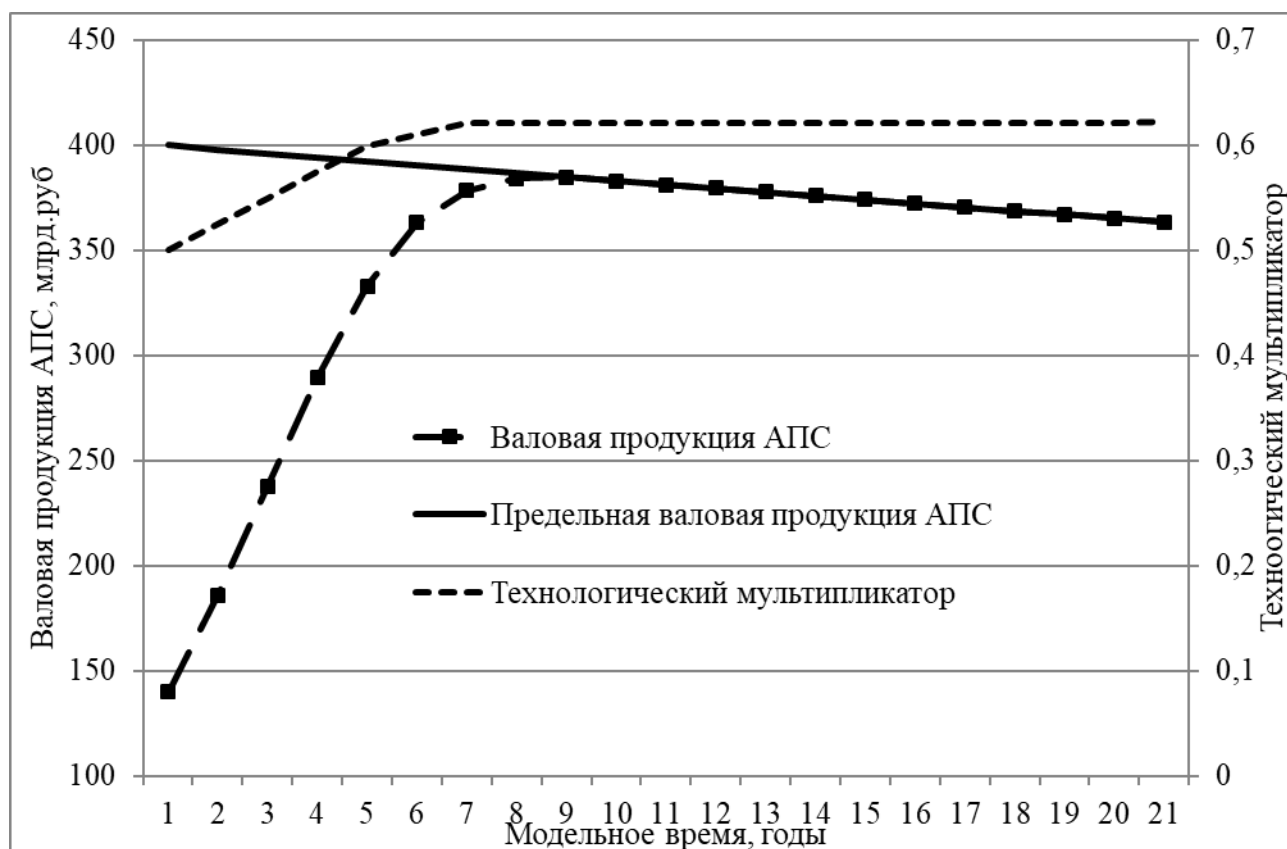


Рисунок 4 - Динамика фазовых переменных, соответствующая первому сценарию.

Источник: получено по результатам расчетов автора.

На рисунках 5 и 6 показаны результаты моделирования для второго сценария. В условиях «жесткого сценария» затраты на климатическую адаптацию АПС резко возрастают. Меняется также характер господдержки: при сохранении ограничений на управление поддержка должна осуществляться практически на всем интервале времени с максимально возможной интенсивностью; возрастает и продолжительность инвестиций в технологическое развитие.

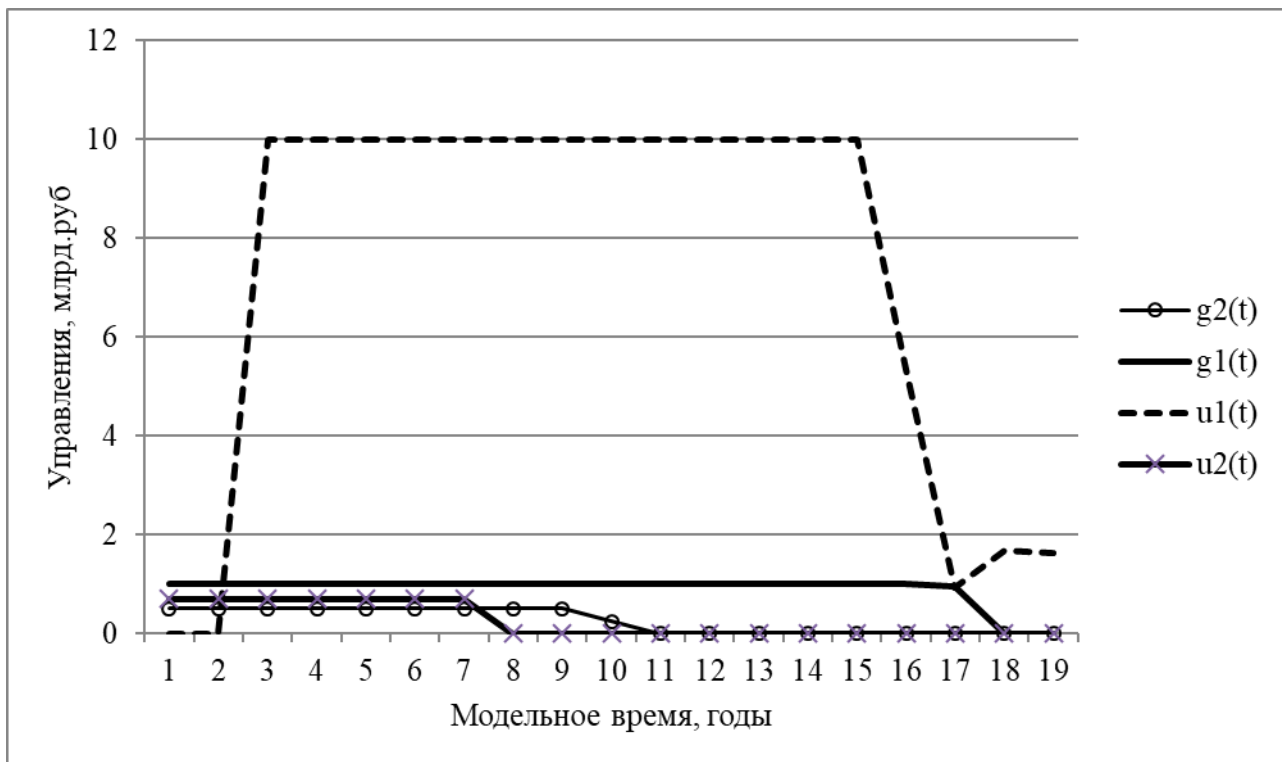


Рисунок 5 - Стратегия адаптации, соответствующая «жесткому» климатическому сценарию.

Источник: получено по результатам расчетов автора.

Стратегии адаптации к «жесткому» климатическому сценарию (рис. 5), соответствует траектория развития АПС, представленная на рисунке 6.

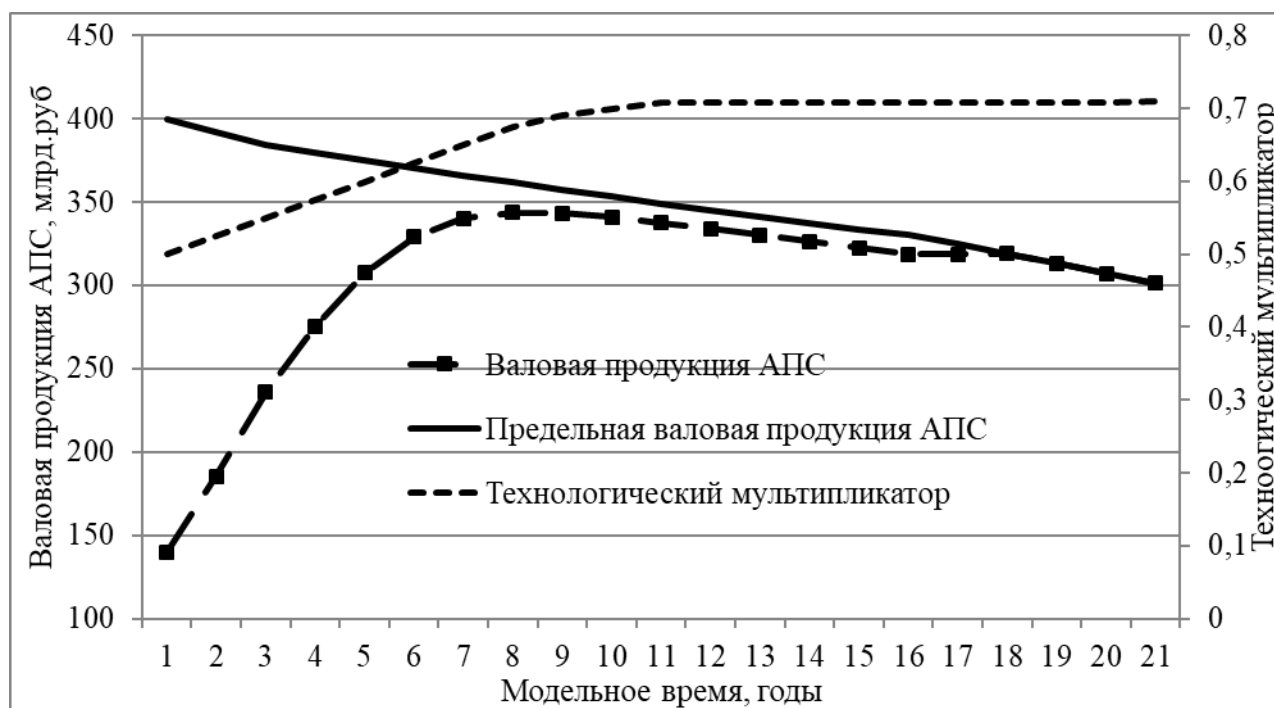


Рисунок 6 - Динамика фазовых переменных, соответствующая второму сценарию.

Источник: получено по результатам расчетов автора.

Несмотря на существенные затраты АПС на климатическую адаптацию ей не удастся сохранить темпы роста, как у первого сценария. Можно предположить, что без существенного роста объемов господдержки функционирование АПС в таких условиях будет неустойчивым в финансово-экономическом смысле. Это действительно так: при увеличении максимума господдержки до 5 млрд. руб. в год достигается полная компенсация климатических воздействий «жесткого» сценария. При этом характер управляющих воздействий меняется незначительно.

Заключение. Математическое моделирование - это незаменимый инструмент для анализа и прогнозирования развития сложных систем. Агрегированная модель, представленная в этой работе, помогает понять процессы адаптации к изменению климата и смягчению его последствий, а также информировать лиц, принимающих решения, о компромиссах между вариантами мер регулирования. Различные сценарии позволяют исследовать долгосрочные эффекты от регулирующих воздействий на всю АПС.

Моделирование АПС во внешней среде возможно с различной степенью детализации имитируемых процессов и подсистем. Однако, АПС – это чрезвычайно сложный объект для моделирования. Эта сложность – следствие необходимости учета постоянно меняющихся условий, как экономических, так и природно-климатических, ограниченного понимания всех взаимосвязей между адаптацией АПС к изменению климата и противодействием глобальному потеплению. Современная потребность в нелинейных, динамических, мультидисциплинарных и многоуровневых моделях АПС отмечается во многих современных исследованиях (например, в специальном аналитическом обзоре [8]). Разработчики моделей констатируют такие трудности, как неполнота знаний о всех сторонах функционирования АПС, разбросанных по разным дисциплинам (физика, химия, биология и другие), разнообразие задействованных в процесс моделирования лиц (ученые, эксперты, операторы процессов, руководящие и финансирующие органы), дефицит, неопределенность и высокая стоимость необходимых данных, разнящихся по временным и пространственным масштабам. Как было отмечено в [6, 9], для адекватной модели чрезвычайно важна ее калибровка на достаточно полном массиве данных. Оценка адекватности «больших» моделей даже при современном высоком уровне компьютерных технологий – весьма непростая задача. При всех перечисленных выше сложностях задача синтеза оптимальных регуляторов адаптивного типа, которые должны быть получены в результате расчетов на «больших» моделях, представляется неоправданно сложной. Напротив, использование агрегированной модели дает возможность решить задачу оптимального управления процессом адаптации, то есть определить форму программного управления и использовать эту качественную информацию для адаптации АПС.

Литература

1. Shukla P. R. et al. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. – 2019.
2. Сиптиц, С. О. Моделирование агропродовольственных систем для разработки стратегии адаптации к глобальному изменению климата и снижению выбросов углерода / С. О. Сиптиц, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2022. – № 2(84). – С. 50-59. – DOI 10.33938/222-50.
3. Сиптиц, С. О. Влияние природно-климатического фактора на устойчивость аграрного производства / С. О. Сиптиц, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2018. – № 4. – С. 15-19.
4. Siptits, S. O. Model Estimates of Climate Impact on Grain and Leguminous Crops Yield in the Regions of Russia / S. O. Siptits, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // Studies on Russian Economic Development. – 2021. – Vol. 32, No. 2. – P. 169-176. – DOI 10.1134/S1075700721020106. – EDN YPBVMT.
5. Романенко, И. А. Агропродовольственная стратегия регионов в условиях неопределенности будущего климата / И. А. Романенко, С. О. Сиптиц, Н. Е. Евдокимова. – Москва : б/и, 2020. – 204 с. – (Научные труды ВИАПИ им. А.А. Никонова).
6. Сиптиц, С. О. Цифровые платформы в процессе управления агропродовольственными системами с учетом долгосрочных климатических изменений / С. О. Сиптиц, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // Экономика сельского хозяйства России. – 2021. – № 9. – С. 4-11. – DOI 10.32651/219-4.
7. Устойчивость размещения аграрного производства по регионам России с учетом рисков климатических изменений / И. А. Романенко, С. О. Сиптиц, Н. Е. Евдокимова, Н. М. Светлов. – Москва : Аналитик, 2018. – 168 с. – (Научные труды ВИАПИ им. А.А. Никонова).

8. Perrot N. et al. Modelling and analysis of complex food systems: state of the art and new trends // Trends in Food Science & Technology. – 2011. – Т. 22. – №. 6. – С. 304-314.

9. Разработать базы данных региональных агропродовольственных систем, содержащие инструментарий для оценки их эффективности и устойчивости: отчет о НИР ВИАПИ им. А.А. Никонова / Рук. темы С.О. Сиптиц. Рег. № 115102840012. - М.: ВИАПИ, 2015.

References

1. Shukla P. R. et al. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. – 2019.

2. Siptic, S. O. Modelirovanie agroprodovol'stvennyh sistem dlya razrabotki strategii adaptacii k global'nomu izmeneniyu klimata i snizheniyu vybrosov ugleroda / S. O. Siptic, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom hozyajstve. – 2022. – № 2(84). – S. 50-59. – DOI 10.33938/222-50.

3. Siptic, S. O. Vliyanie prirodno-klimaticheskogo faktora na ustojchivost' agrarnogo proizvodstva / S. O. Siptic, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // Mezhdunarodnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal. – 2018. – № 4. – S. 15-19.

4. Siptits, S. O. Model Estimates of Climate Impact on Grain and Leguminous Crops Yield in the Regions of Russia / S. O. Siptits, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // Studies on Russian Economic Development. – 2021. – Vol. 32, No. 2. – P. 169-176. – DOI 10.1134/S1075700721020106. – EDN YPBVMT.

5. Romanenko, I. A. Agroprodovol'stvennaya strategiya regionov v usloviyah neopredelennosti budushchego klimata / I. A. Romanenko, S. O. Siptic, N. E. Evdokimova. – Moskva : b/i, 2020. – 204 s. – (Nauchnye trudy VIAPИ im. A.A. Nikonova).

6. Siptic, S. O. Cifrovye platformy v processe upravleniya agroprodovol'stvennymi sistemami s uchetom dolgosrochnyh klimaticheskikh izmenenij /

S. O. Siptic, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // *Ekonomika sel'skogo hozyajstva Rossii*. – 2021. – № 9. – S. 4-11. – DOI 10.32651/219-4.

7. Ustojchivost' razmeshcheniya agrarnogo proizvodstva po regionam Rossii s uchetom riskov klimaticheskih izmenenij / I. A. Romanenko, S. O. Siptic, N. E. Evdokimova, N. M. Svetlov. – Moskva : Analitik, 2018. – 168 s. – (Nauchnye trudy VIAPI im. A.A. Nikonova).

8. Perrot N. et al. Modelling and analysis of complex food systems: state of the art and new trends // *Trends in Food Science & Technology*. – 2011. – Т. 22. – №. 6. – S. 304-314.

9. Razrabotat' bazy dannyh regional'nyh agroprodukovol'stvennyh sistem, sodержashchie instrumentarij dlya ocenki ih effektivnosti i ustojchivosti: otchet o NIR VIAPI im. A.A. Nikonova / Ruk. temy S.O. Siptic. Reg. № 115102840012. - M.: VIAPI, 2015.

© *Сиптиц С.О., 2023. International agricultural journal, 2023, №5, 1366-1383.*

Для цитирования: Сиптиц С.О. ДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НИЗКО УГЛЕРОДНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ СИСТЕМ // *International agricultural journal*. 2023. №5, 1366-1383.