

Ситуационное моделирование возможностей достижения стратегических целей сельским хозяйством России: анализ на уровне страны и отдельных регионов

Рябов Иван Юрьевич^{1,2}, Понькина Елена Владимировна¹, Строков Антон Сергеевич²

¹Алтайский государственный университет,
Россия, Барнаул, ivan.ryabov.y@mail.ru

²Центр агропродовольственной политики Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС),
Россия, Москва

Аннотация. Ситуационное моделирование позволяет анализировать и прогнозировать «поведение» организационных систем в различных условиях. Одним из ключевых инструментов в данной области являются модели динамики социально-экономических систем. Модели, описывающие процессы изменения землепользования (Land Use Change – LUC), позволяют исследовать не только динамику регионального развития в определенных климатических и социально-экономических сценарных условиях, но и оценить перспективы и возможные последствия достижения долгосрочных стратегических целей. В работе использована рекурсивная модель динамики аграрного землепользования GLOBIOM для ситуационного моделирования достижения цели углеродной нейтральности аграрной отрасли России в случае двух сценариев – инерционное социально-экономическое развитие согласно сценарию SSP2 без учета специальных налогов на выброс парниковых газов (ПГ) и с учетом введения налога на единицу выбросов ПГ. Результаты моделирования представляют информационную основу для понимания перспектив достижения углеродной нейтральности для рассмотренных вариантов воздействия на агропроизводственную систему, что актуально для реализации политики устойчивого развития аграрного комплекса России и социально-экономического развития территорий. Также моделирование на уровне регионов позволяет оценить возможные последствия для их развития в виде изменения объемов производства продукции сельского хозяйства и перераспределения земельных ресурсов. Среди регионов России фокус исследования направлен на регионы Большого Алтая (Алтайский край, Республики Алтай и Тыва), где Алтайский край представляет крупный агропромышленный регион с наибольшим в стране углеродным следом в сельскохозяйственном производстве, а Республики Алтай и Тыва – этнические республики с менее выраженным аграрным потенциалом и выраженным уклоном на развитие животноводства. Период моделирования охватывает 2030-2050 гг.

Ключевые слова: ситуационное моделирование, сценарный анализ, аграрное развитие, GLOBIOM, углеродный налог, землепользование

Цитирование: Рябов И.Ю. Ситуационное моделирование возможностей достижения стратегических целей сельским хозяйством России: анализ на уровне страны и отдельных регионов / И.Ю. Рябов, Е.В. Понькина, А.С. Строков // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 140-153. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.012.

Введение. Сельское хозяйство является одной из ключевых отраслей экономики, играющих важнейшую роль не только в обеспечении продовольственной безопасности, но и в общем социально-экономическом развитии государства. В последние годы повестка устойчивого развития, в частности, снижения негативного влияния отраслей экономики на климат посредством снижения выбросов парниковых газов (ПГ), влияет на формирование национальной аграрной политики многих стран и ключевые стратегические цели развития аграрного комплекса. Так, в России помимо ряда новых законопроектов [1-3], в 2023 г. принята климатическая доктрина [4], согласно которой в качестве ключевой долгосрочной цели рассматривается – «достижение, с учётом национальных интересов и приоритетов социально-экономического развития, не позднее 2060 года баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением». В связи с этим активизировались научные исследования и разработки, касающиеся как учета и оценки выбросов ПГ по отраслям

экономики на различных уровнях территориального управления, так и в области моделирования баланса ПГ от хозяйственной деятельности для различных социально-экономических условий и вариантов снижения «углеродного следа» [5-7].

Одной из обсуждаемых практик достижения углеродной нейтральности является введение налога на выбросы ПГ. На сегодняшний день подобные практики применяются в развитых государствах, например, таких, как Дания и Новая Зеландия и закреплены на законодательном уровне [8]. В России нет однозначного мнения о внедрении подобного механизма регулирования, а также отсутствуют и оценки возможных последствий и рисков его реализации для сельского хозяйства, влиянию на продовольственную безопасность и экспортный потенциал страны [9, 10]. Эти вызовы дают широкий простор для дискуссий и исследований по данным направлениям. В этих условиях ситуационное моделирование является неотъемлемым инструментом для понимания, анализа и прогноза поведения подобных систем в различных социально-экономических условиях. Одним из инструментов выступают различные модели динамики землепользования [11-13], позволяющие оценить не только динамику регионального развития в определенных климатических и социально-экономических условиях, но и перспективы и возможные последствия достижения долгосрочных стратегических целей на уровне отдельных регионов по отраслям экономики.

Несмотря на многочисленные научные результаты в этой области в мировой науке [14, 15], в России исследование данного вопроса вызывает определенные сложности ввиду больших масштабов территории, разнообразия почвенно-климатических условий сельскохозяйственного производства и используемых технологий, наличия региональной специфики сельскохозяйственного производства и социально-экономического развития. Поэтому использование детальных экономико-математических моделей, описывающих динамику развития агропроизводственной системы в разрезе не только регионов, но и некоторого зонального деления территории, позволит в большей мере учесть локальные особенности сельскохозяйственного производства. Рекурсивная модель динамики аграрного землепользования GLOBIOM учитывает вышеобозначенные аспекты и опирается на детальные пространственные данные моделирования продуктивности сельскохозяйственных культур для различных социально-климатических сценариев (SSP).

В работе использована рекурсивная модель динамики аграрного землепользования GLOBIOM для ситуационного моделирования достижения цели углеродной нейтральности аграрной отрасли России с учетом двух сценариев, приведенных ниже.

Целью исследования является сравнительный анализ достижимости цели углеродной нейтральности сельскохозяйственным производством России в случае двух сценариев – инерционное социально-экономическое развитие согласно сценарию SSP2 без учета специальных налогов на выброс парниковых газов и с учетом введения налога на единицу выбросов ПГ. Анализ на уровне отдельных регионов сфокусирован на регионах Большого Алтая [16], включающих Алтайский край, Республику Алтай и Республику Тыва.

Алтайский край является стратегически важным агропромышленным регионом России, обрабатывающим наибольшие площади пашни среди регионов России, именуемый «Житницей Сибири». Регион занимает одну из ключевых позиций в стране по объемам производства зерна, гречихи, льноволокна и подсолнечника. Предварительные исследования углеродного следа от производства продукции растениеводства показали, что растениеводство в Алтайском крае не является углеродно нейтральным и характеризуется наибольшими выбросами ПГ среди других регионов России, что делает этот регион интересным для исследования с точки зрения введения ограничительной меры на выбросы парниковых газов, такой, как углеродный налог [5]. Республики и Алтай и Тыва, наравне с

Алтайским краем, входят в группу трансграничных регионов Большого Алтая. Эти этнические республики, с одной стороны, обладают схожим территориальным и культурным наследием, а с другой, экономика этих регионов не имеет выраженной аграрной специализации, характеризуется малыми площадями посева сельскохозяйственных культур, но развивающимся сектором животноводства. Доля сельского населения в данных регионах значительна, поэтому сельское хозяйство выступает как фактор основной занятости сельского населения.

Анализ аграрного потенциала отрасли, как в целом на уровне России, так и в выделенных периферийных трансграничных регионах, в изменяющихся климатических условиях до 2050 года в контексте исследования влияния углеродного налога представляется важным для формирования адекватной аграрной политики, учета и предупреждения возможных негативных последствий.

1. Методы. В качестве инструмента ситуационного моделирования для решения данной задачи использована рекурсивная модель частичного равновесия *Global Biosphere Management Model* (GLOBIOM) [11, 17] и ее региональный российский модуль [18, 5]. Модель разработана и используется Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA, Люксембург).

Модель GLOBIOM описывает динамику аграрного землепользования в пространстве на глобальном уровне по следующим слоям:

- земельные ресурсы (land cover), включает детальные пространственные данные земельного покрова и растительности в виде гридов с размером ячейки 1o (111 кв км);
- землепользование (land use) представляет распределение земельных ресурсов по видам землепользования (возделываемые земли – пашня, сенокосы, пастбища, неиспользуемые земли, леса), включая сценарно-заданные параметры используемых технологий в производстве (low input, high input, irrigation, tillage, fertilizer), управление земельными ресурсами осуществляется на уровне ячеек грида;
- производство (production), оценка объемов производства продукции, исходя из распределения земельных ресурсов по видам использования и по секторам растениеводства и животноводства на уровне ячеек грида с последующим агрегированием на уровень регионов и страны;
- формирование спроса на продукцию по секторам экономики (demand), исходя из энергетических потребностей населения и животных для обеспечения жизнедеятельности согласно сценариям SSP на национальном уровне;
- рынки и цены (markets), определяющие баланс спроса и предложения на товарных рынках, а также экспорт излишков товаров; баланс товарных рынков моделируется на национальном уровне на основе максимизации функции общественного благосостояния.

Структурные блоки модели, отвечающие за оценку объемов производства продукции, включают: модель динамики производства продукции растениеводства (*Crop model*), в частности, модель урожайности культур EPIC; модель динамики производства продукции животноводства (RUMINANT, *Digestibility model*); модель биоэнергетического баланса (BIOENERGY, *Processing model*); и модели динамики лесной растительности (G4M, *Global Forest Model*). Более детально описание моделей можно найти в документации [11]. Исходный вариант GLOBIOM ориентирован на оценку оптимального режима землепользования в мире с точки зрения общественного благосостояния производителей и потребителей продукции сельского и лесного хозяйства для заданных сценарных условий SSP на перспективу до 2100 года. При этом временной лаг моделирования составляет 10 лет. Модель является рекурсивной динамической моделью, когда, используя решение на предшествующем периоде,

формируется система ограничений модели для оптимизации целевой функции для текущего периода. При этом ключевые параметры оптимизационной модели описаны в динамике и пересчитываются через темпы роста базовых показателей.

В работе использован российский аналог модели, представляющий модификацию глобальной модели GLOBIOM, расширенный для моделирования изменения площадей посева для 28 культур, возделываемых в России (в исходной модели – 18 культур, для России – 12), с модифицированной системой ограничений, учитывающих ограничения на величины средних темпов прироста площадей посева по регионам. Российский модуль GLOBIOM ориентирован на вычисление оптимального значения функции общественного благосостояния в целом для России в сумме по регионам. В рамках российской версии модели GLOBIOM параметры международной торговли между Российской Федерацией и другими странами полностью соответствуют показателям глобального варианта модели. Важным блоком в модели является оценка баланса ПГ и его элементов (поглощение и связывание углерода). В российском модуле модели также внедрена новая методика оценки выбросов ПГ с учетом требований российского стандарта по методике Минприроды [19].

Учитывая то, что в качестве основных входных данных выступают пространственные данные с размером ячейки 111 кв. км – 1° , в качестве пространственной единицы моделирования выступает LUID (*Land Unique Identifier*). В российском аналоге модели LUID уточнены в границах регионов. Управление землепользованием осуществляется на уровне LUID, где определяется распределение площадей земель по видам землепользования на каждый период t , а в растениеводстве – и по видам возделываемых культур. Кроме того, на уровне LUID содержатся пространственные данные, определяющие ключевые параметры модели – типы земельного покрова, относительные оценки затрат ресурсов при использовании различных технологий в сельском и лесном хозяйстве, сценарные оценки продуктивности сельскохозяйственных культур для различных вариантов технологий. Для моделирования объемов производства по видам продукции используются производственные функции В. Леонтьева. Нелинейные функции в модели, в частности, функции спроса, преобразуются методом пошаговой линеаризации.

Модель обеспечивает максимизацию функции общественного благосостояния по отрасли сельского и лесного хозяйства в целом за минусом налога на эмиссию ПГ за счет управления земельными ресурсами в секторах сельскохозяйственного производства, биоэнергетики и лесного хозяйства на каждый период времени ($t = 1, \dots, T$) при условии выполнения системы ограничений:

$$W_t(x_t, y_t, z_t) = CS_t(x_t, y_t, z_t) + PS_t(x_t, y_t, z_t) - a \cdot GHG_t(x_t, y_t) \rightarrow \max_{(x_t, y_t, z_t) \in \Omega_t}, \quad (1)$$

где W_t – функция общественного благосостояния (*Welfare*); CS_t – излишек потребителя (*Consumer Surplus*); PS_t – излишек производителя или прибыль (*Producer Surplus*), определяемый как выручка от реализации продукции (*Total Revenue – TR*) минус общие производственные расходы и расходы, связанные с изменением землепользования (*Total Production Costs – TPC*) ($PS_t = TR_t - TPC_t$); GHG_t – функция уплаты налога на выброс ПГ; x_t – множество переменных для сектора растениеводства, устанавливаемые на уровне LUID; y_t – множество переменных модели для сектора животноводства на уровне LUID; z_t – множество прочих переменных, включающих переменные для лесного и биоэнергетического секторов; a – параметр сценария ($a = 1$, в случае использования углеродного налога, $a = 0$ – в противном случае).

Модель (1) является оптимизационной моделью большой размерности, которая позволяет найти оптимальный, с точки зрения общественного благосостояния, режим использования земельных ресурсов $(x_t^*, y_t^*, z_t^*) \in \Omega_t, t = 1, \dots, T$. Всего на уровне России

выделено 927 LUID, в каждом из которых находится оптимальное распределение земельных ресурсов. Таким образом, количество переменных в модели составляет более 35 тысяч. Именно ввиду большой размерности глобальный вариант GLOBIOM содержит только основные наиболее востребованные товарные культуры. В работе рассматривается горизонт моделирования – 2050 г. Система ограничений, описывающая конфигурацию множества Ω_t , определена оптимальным решением предшествующего периода $\Omega_t(x_{t-1}^*, y_{t-1}^*, z_{t-1}^*)$ и включает уравнения баланса спроса и предложения на рынке, ограничения по площади используемых земель, ограничения на величину прироста площадей по видам землепользования и по культурам, а также по приросту поголовья скота. Использование модели GLOBIOM позволяет определить наилучший вариант развития производства в заданных сценарных условиях для страны в целом, для выбранных сценарных условий, с учетом наличия или отсутствия вмешательства в виде углеродного налога ($a = 1/0$). Решение на уровне региона соответствует оптимуму для системы в целом, как в случае централизованного управления. Более детально математическая модель описана в отдельной публикации [20]. Для управления параметрами модели и переменными разработаны скрипты на языке R. Решение оптимизационной модели выполняется в среде GAMS.

Функция выплаты налога на единицу эмиссии парниковых газов (GHG_t) уменьшает прибыль производителей и равна сумме затрат на выплаты за выбросы ПГ по видам производимой продукции:

$$GHG_t = Tax \cdot E, \quad (3)$$

где Tax – цена за тонну выбросов ПГ; E – объем выбросов парниковых газов, в тоннах. Объемы выбросов парниковых газов вычисляются через заложенные в модель коэффициенты выбросов на единицу площади и поголовья скота, как:

$$E = \sum_{i=1}^N (x_{t,i}^s \cdot Cs + y_{t,i}^p \cdot Cl),$$

где $x_{t,i}^s$ – посевные площади культур, определенные в каждом LUID i ; $y_{t,i}^p$ – поголовье скота в каждом i -ом LUID; Cs и Cl – коэффициенты выбросов парниковых газов на единицу площади и поголовье скота соответственно. Коэффициенты выбросов парниковых газов определены для каждой отдельной культуры и каждого вида животных.

Общий баланс ПГ в секторе растениеводства ($EMIS_{crop_t}$) определяется величиной разности между выбросами и поглощением (связыванием) углерода в почве (ΔC_t), суммой эмиссий ПГ от выращивания риса (CH_{4rice_t}) и эмиссии в результате использования удобрений ($N_2O_{crop_t}$):

$$EMIS_{crop_t} = \Delta C_t + CH_{4rice_t} + N_2O_{crop_t}. \quad (4)$$

Эмиссия ПГ от деятельности сектора животноводства включает ($EMIS_{livestock_t}$) и содержит эмиссии от кишечной ферментации ($CH_{4Entferm_t}$), эмиссии от использования ($CH_{4Manmgt_t}$ и $NO_{2Manprp_t}$) и хранения навоза ($NO_{2Manprp_t}$):

$$EMIS_{livestock_t} = CH_{4Entferm_t} + CH_{4Manmgt_t} + NO_{2Manprp_t} + NO_{2Manmgt_t}. \quad (5)$$

Общий баланс ПГ (ΔCO_{2t}^3) и углеродный след (CF_{crop_t}) от производства сельхозпродукции оценивается величиной:

$$\Delta CO_{2t}^3 = EMIS_{crop_t} + EMIS_{livestock_t}, \quad (6)$$

$$CF_{crop_t} = \frac{\Delta CO_{2t}^3}{V_t}, \quad (7)$$

где V_t – объем продукции растениеводства в зерновых единицах, продукции животноводства – ккал.

Совокупный баланс ПГ оценивается в тоннах, положительная величина ΔCO_{2t}^3 и CF_{crop_t} характеризует эмиссию ПГ (нетто-эмиссию), а отрицательная – нетто-поглощение

(секвестрация) углекислого газа. Таким образом, использованная в модели методика (4-7) является комплексной для оценки баланса ПГ, включающей основные его элементы, учитываемые FAO, и скорректированной с учетом требований российского стандарта [19].

Для настройки качества воспроизводимости динамики аграрного землепользования российским модулем GLOBIOM выполнена калибровка основных параметров модели, основанная на использовании статистических данных по регионам по площадям посева, урожайностям культур, валовым сборам и объемам производства продукции животноводства, выполнена также коррекция трендов урожайности культур. В качестве периода моделирования по фактическому времени рассматривался условный 2010-2020 гг., калибровка модели для этого периода осуществлена по регионам России по данным Росстат 2011 и 2019 гг. Выбор именно этого периода (2011 и 2019 гг.) обусловлен тем, что за это время произошел существенный рост производства сельскохозяйственной продукции и частичная распахка заброшенных сельхозземель, которая привела к дополнительным эмиссиям ПГ. Кроме того, в 2010 году сельскохозяйственное производство столкнулось с последствиями засухи, а в 2020 году – с последствиями пандемии. Поэтому наиболее представительными с точки зрения динамики аграрного землепользования являются 2011 и 2019 гг. С учетом прошедшего времени этот подход также остается актуальным, поскольку в период 2020-2025 гг. было много внешних шоков и санкций для экономики и сельского хозяйства России, но явного снижения производства производимой продукции растениеводства и животноводства не наблюдалось, в т.ч. и в фокусных регионах. На 2030 год моделирования в качестве ограничений площадей посева и темпов прироста урожайности культур использованы данные РОССТАТ за 1990-2023 годы. На период 2040-2050 гг. использованы параметры, заложенные в сценарии SSP2. Объемы производства приведены к единым единицам измерения – по сектору растениеводства – зерновые единицы, по сектору животноводства – ккал.

Ввиду рекурсивности, процесс нахождения оптимального решения динамической модели можно представить следующим образом – для заданных экзогенных параметров модели и накладываемых общих условий и ограничений на основе начальных данных (или данных прошлого шага модели) находится оптимальное решение, максимизирующее общественное благосостояние для текущего периода времени, получая при этом новое решение по ключевым переменным модели. Оптимальное решение, полученное в результате моделирования, предоставляет оценку потенциала использования сельскохозяйственных угодий, а также производства, потребления и экспорта сельскохозяйственной продукции с учетом балансовых и технологических ограничений, в заданных сценарных условиях на национальном и региональном уровнях. Оптимальное решение отражает наилучшее распределение и возможное расширение или, наоборот, снижение производственных мощностей по регионам Российской Федерации, что, в свою очередь, характеризует вклад регионов в достижение максимума общего совокупного благосостояния, включая экологические последствия, такие, как выбросы ПГ. Таким образом, оптимальное решение на уровне региона демонстрирует его потенциальный вклад в общий национальный результат. Однако следует отметить, что модель не детализирует перемещение продукции между регионами Российской Федерации. Эти аспекты являются важными в понимании обнаруженных фактически-наблюдаемых тенденций от полученных в результате поиска оптимального решения.

Модифицированный российский аналог модели показал приемлемую точность моделирования объемов производства сельскохозяйственной продукции для базового SSP2 сценария как на уровне страны, так и на уровне регионов по фактическому периоду. Расчеты были выполнены на уровне регионов России с последующим обобщением на национальный

уровень. Всего задействованы 77 субъектов Российской Федерации, где возделывались используемые в модели культуры, по которым имелись полные статистические данные. Ряд регионов не участвовали в моделировании (Республика Крым, Ненецкий, Ямало-Ненецкий, Чукотский автономные округа, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, а также Донецкая Народная Республика, Луганская Народная Республика, Запорожская и Херсонская области) ввиду отсутствия в открытом доступе первичных статистических данных или отсутствия посевных площадей. Анализ результатов моделирования на уровне Алтайского края и Республик Алтай и Тыва позволяет обнаружить возможные последствия для развития некоторых регионов России, дающих контрастные результаты с общими благоприятными результатами на национальном уровне.

2. Сценарии. Сценарное моделирование использует параметры базового сценария SSP2, которые разработаны международной группой экспертов и широко представлены в литературе [5, 11]. Этот сценарий предполагает продолжение текущих социально-экономических тенденций, в том числе в сельском хозяйстве.

Ситуационное моделирование предполагает сравнительное исследование потенциала аграрного производства в случае инерционного развития согласно SSP2, но для двух случаев – при отсутствии взимания углеродного налога (не УН) и в случае взимания углеродного налога на единицу выбросов ПГ (УН) (таблица 1).

Таблица 1. Параметры ситуационного сценарного моделирования

Стратегическая цель	Критерий достижения	Варианты вмешательства в агропроизводственную систему	Параметр модели	Социально-экономический и климатический сценарий
Достижение углеродной нейтральности сельским хозяйством России	Баланс ПГ – $\Delta CO_{2t}^g \leq 0$	Введение углеродного налога – “УН”	$a=1$	SSP2
		Углеродный налог не взимается – “не УН”	$a=0$	SSP2

Источник: составлено авторами.

3. Результаты

3.1. Результаты моделирования по фактическому периоду. Результаты моделирования по фактическому периоду 2011-2019 гг. преследовали цель оценить качество воспроизведения динамики изменения площадей посева и валовых сборов основных товарных культур, а также объемов производства продукции животноводства, как на национальном, так и региональном уровнях (таблица 2). Сравнение показателей с данными РОССТАТ по абсолютным и относительным отклонениям показывает приемлемую сходимость результатов моделирования. В частности, относительное отклонение по основным показателям развития аграрного сектора на национальном уровне не превышает 1%. На региональном уровне наблюдаются схожие показатели, и для крупнейших аграрных регионов страны относительное отклонение от данных РОССТАТ является близким к показателям на национальном уровне. Однако, если в относительно крупных аграрных регионах, таких, как Алтайский край, отклонение практически по всем ключевым показателям не превышает 1%, то в малых регионах, где аграрное развитие не является основной экономической деятельностью, в том числе Республике Алтай, отклонение по производству продукции превышает 2%. При этом

чем меньше объемы производства в регионе, тем отклонение выше. Так, в Республике Тыва только по площадям посева отклонение превышает показатель в 40%, т.е. с точки зрения максимизации общественного благосостояния, по отрасли наращивать или сохранять объемы производства продукции растениеводства в этом регионе нецелесообразно ввиду сложных климатических условий и низкой продуктивности сельскохозяйственных угодий. При этом фактические значения площадей посева превышают оптимальные, что свидетельствует о том, что меры государственной поддержки и программы развития сельского хозяйства в данных регионах играют важное значение. Кроме того, в секторе животноводства модель показывает большие объемы производства молока и мяса, что говорит о высокой потребности общества в данном виде продуктов.

Таблица 2. Результаты моделирования на 2019 г.

	Продукция растениеводства, тыс. т зерн. ед.	Площади посева, тыс. га	Произво- дство молока, тыс. т	Произво- дство мяса, тыс. т
<i>Россия итого</i>				
Данные РОССТАТ	195283	78328	30411	10646
Модельные оценки	196647	78424	30353	10534
Отклонение (%)	0,7	0,1	-0,2	-1,1
<i>Алтайский край</i>				
Данные РОССТАТ	7040	5119	1204	193
Модельные оценки	7057	5120	1190	195
Отклонение (%)	0,3	0,02	-1,2	1,4
<i>Республика Алтай</i>				
Данные РОССТАТ	103	103	74	20
Модельные оценки	105	102	85	19
Отклонение (%)	2,6	0,5	14,6	-2,7
<i>Республика Тыва</i>				
Данные РОССТАТ	58	51	65	12
Модельные оценки	45	30	68	8
Отклонение (%)	23,1	40,8	4,6	-27,2

Источник: расчеты авторов на основе модели GLOBIOM Russia, 2025.

3.2. Результаты ситуационного моделирования до 2050 г. Результаты расчетов показали (таблица 3), что внедрение налога потенциально может привести к значительному снижению выбросов ПГ в аграрном секторе как на уровне страны (более чем в 6 раз к 2050 году – с 101 млн тонн до 15 млн тонн в эквиваленте CO₂ относительно модельных данных для 2020 года), так и на уровне наиболее неустойчивых регионов. Однако, несмотря на существенные изменения баланса углерода в целом, регионов, переходящих из разряда нетто-эмитентов в нетто-поглотители, практически не наблюдается. Связано это прежде всего с тем, что наиболее существенные изменения произошли в наиболее неустойчивых регионах, обладающих высокими показателями выбросов парниковых газов. Для других субъектов также наблюдается снижение общего уровня баланса углерода, но оно является недостаточным для перехода.

Таблица 3. Баланс эмиссий парниковых газов, тыс. т CO₂

Территория	2020 г.	2050 г.		Изменение относительно уровня 2020 г. (%)	
		не УН (a=0)	УН (a=1)	не УН (a=0)	УН (a=1)
Россия, итого по регионам	101062	35015	14843	-65	-85
в том числе					
Алтайский край	10543	11297	8294	7	-21
Республика Алтай	324	405	227	25	-30
Республика Тыва	186	180	172	-3	-8

Источник: расчеты авторов на основе модели GLOBIOM Russia, 2025.

Так, наиболее существенные изменения касаются сельского хозяйства в Алтайском крае (таблица 3). Снижение общего показателя баланса эмиссий в данном регионе составляет более 2 млн тон, что в совокупности приводит к значительному снижению углеродного следа продукции (рис. 1). В близлежащих к нему регионах возможны также существенные изменения в балансе углерода, однако, ввиду малых площадей посева и валовых сборов продукции, баланс парниковых газов и углеродный след продукции изменяются либо незначительно (Республика Тыва), либо имеют значительные перепады (Республика Алтай). Объясняется это тем, что даже относительно незначительное изменение площадей посева или структуры производства в значительной мере оказывает влияние как на баланс эмиссий парниковых газов, так и на углеродный след. Тем не менее, по всем трем регионам значения показателя, рассчитанного по сценарию с налогообложением, ниже, чем для аналогичного SSP2 сценария.

Таким образом, в целом по стране достижение стратегической цели снижения выбросов парниковых газов возможно в обоих моделируемых ситуациях. По исследуемым регионам баланс ПГ устойчиво снижается при введении налога.

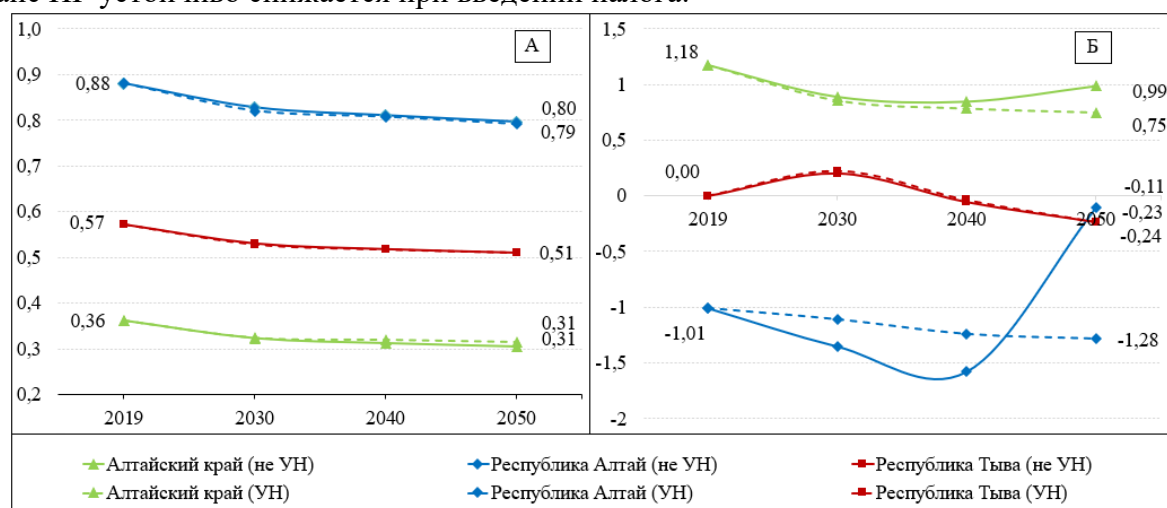


Рис 1. Углеродный след продукции по секторам (А) – животноводства, (Б) – растениеводства

Источник: расчеты авторов, 2025.

Несмотря на положительную динамику по снижению уровня выбросов парниковых газов, введение налога может оказать потенциально негативные последствия. Так, показатели производства продукции растениеводства являются значительно ниже, чем для альтернативного сценария (базового SSP2). В Алтайском крае только по площадям посевов

снижение достигает более 250 тысяч га, что оказывает влияние на общий выпуск продукции как животноводства, так и растениеводства (таблица 4). Выведение земель из оборота приводит к снижению объемов производства продукции животноводства. Последствия введения углеродного налога могут негативно сказаться на развитии региональных экономик, особенно аграрно-ориентированных регионов, и занятости сельского населения.

Таблица 4. Динамика показателей аграрного сектора до 2050 г.

Территория	Сценарии	Продукция растениеводства, тыс. т зерн. ед.	Посевные площади, тыс. га	Производство молока, тыс. т	Производство мяса, тыс. т
<i>Россия</i>					
2020 г.	-	196 647	78 328	30 353	10 534
2050 г.	не УН (a=0)	270 186	79 912	35 619	11 097
	УН (a=1)	231 419	73 292	33 884	9 330
<i>Алтайский край</i>					
2020 г.	-	7 057	5 120	1 190	195
2050 г.	не УН (a=0)	9 079	5 120	1 414	210
	УН (a=1)	8 226	4 868	1 342	181
<i>Республика Алтай</i>					
2020 г.	-	105	102	74	19
2050 г.	не УН (a=0)	141	120	87	22
	УН (a=1)	105	88	83	20
<i>Республика Тыва</i>					
2020 г.	-	45	30	65	8
2050 г.	не УН (a=0)	38	30	76	11
	УН (a=1)	33	27	72	10

Источник: расчеты авторов на основе модели GLOBIOM Russia, 2025.

Аналогичные тенденции наблюдаются и на национальном уровне. Ограничительная мера может привести к значительному снижению площадей посева сельскохозяйственных культур на более чем 5 млн га (с 78 млн га до 73 млн га), со снижением выпуска продукции порядка 39 млн тонн по сравнению со сценарием без вводимых ограничений, что, в свою очередь, приводит к сокращению поголовья скота и продукции животноводства (по производству молока и мяса порядка 2 млн тонн).

В случае сценария без введения углеродного налога, напротив, наблюдаются приросты по всем ключевым показателям, как на уровне страны, так и на уровне Алтайского края. Если на национальном уровне, несмотря на прирост посевных площадей порядка 1,5 млн га, увеличения продукции растениеводства (более 70 млн тонн) и животноводства (более 5 тыс. тонн по молоку и более 0,5 тыс. тонн по мясу), наблюдается снижение выбросов парниковых газов (со 101 до 35 млн тонн), то для Алтайского края, наоборот, общий баланс эмиссий растет, хоть и незначительно. Следует отметить, что для обеих ситуаций в Республиках Алтай и Тыва наблюдается наращивание объемов животноводческой продукции, что в целом – характерная тенденция для этих этнических регионов.

Заключение. Обладая широким набором параметров, гибкостью настройки и построения сценариев, модель GLOBIOM показала себя мощным инструментом для моделирования динамики агропроизводственной системы. С помощью этой модели получены оценки производства продукции сельского хозяйства на национальном и региональном уровнях и исследованы перспективы достижения углеродной нейтральности отечественным

аграрным комплексом. Результаты также позволили оценить потенциальную реакцию системы при введении налогообложения. Согласно результатам расчетов, введение углеродного налога можно рассматривать как положительную, но радикальную меру, обеспечивающую значительное снижение выбросов парниковых газов и путь к достижению поставленных целей, но при условии учета негативных последствий – снижение площадей посева и выпуска сельскохозяйственной продукции. В то же время альтернативный путь показал, что существенного снижения выбросов парниковых газов можно добиться и без внедрения налога как на уровне страны, так и отдельных регионов, за счет оптимизации посевных площадей и технологий в растениеводстве и структуры поголовья скота в животноводстве.

Благодарности. Российский модуль модели GLOBIOM и сценарные расчеты подготовлены в рамках Государственного задания РАНХиГС. Анализ регионального развития, региональные расчеты и статья подготовлены в рамках НИР «Алтайский вектор евразийской экономики: вызовы трансграничности, эффекты, стратегические задачи и приоритеты для Алтайского края» (FZMW-2023-0015).

Список источников

1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. № 309. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (дата обращения: 01.04.2025).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 14.05.2021 г. № 731. – URL: <http://government.ru/docs/all/134619/> (дата обращения: 01.04.2025).
3. Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов» от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ. – URL: <http://government.ru/docs/all/135381/> (дата обращения: 10.03.2025).
4. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 г. № 812. Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910> (дата обращения: 01.04.2025).
5. Рябов И.Ю. Перспективы углеродной нейтральности в сельском хозяйстве России по сценариям SSP: анализ на уровне страны и региона / И.Ю. Рябов, Е.В. Понькина, А.С. Строков // Пространственная экономика, 2024. – Т. 20. – № 1. – С. 26-62. – DOI:10.14530/se.2024.1.026-062.
6. Цареградская М.М. Оценка изменения баланса парниковых газов в атмосфере на основе комплексной геоинформационной пространственно распределенной системы мониторинга / М.М. Цареградская, В.Д. Вязова // Вестник науки и образования, 2023. – №3 (134).
7. Sharkova A. Lemm E. Modeling a Structure of the Fuel and Energy Balance of a Region in the Context of Applying the Concept of Sustainable Development to Achieve Strategic Indicators of Regional Development. MIR (Modernization. Innovation. Research), 2022, no. 13, pp. 513-531, DOI: 10.18184/2079-4665.2022.13.3.513-531.
8. Denmark is First Country to Tax Agriculture Emissions, Climate Adaptation, 2024, available at: <https://climateadaptationplatform.com/denmark-is-first-country-to-tax-agriculture-emissions/> (accessed: 04/01/2025).
9. Сергеева Н.В. Углеродный налог: перспективы применения и вызовы для российской экономики / Н.В. Сергеева // Экономика. Налоги. Право, 2023. – №3.
10. Международные подходы к углеродному ценообразованию. Департамент многостороннего экономического сотрудничества минэкономразвития России, 2021. – URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c13068c695b51eb60ba8cb2006dd81c1/13777562.pdf> (дата обращения: 01.03.2025).
11. Global Biosphere Management Model (GLOBIOM). Integrated Biospheres Futures, International Institute for Applied Systems Analysis (IBF-IIASA). Laxenburg, 2023, 84 p., available at: https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/18996/1/GLOBIOM_Documentation.pdf (accessed: 01/2025).
12. Britz W., Witzke P. CAPRI model documentation 2014, 2014, available at: <https://www.capri-model.org/lib/exe/fetch.php?media=docs:capri-documentation.pdf> (accessed: 04/10/2025).
13. Dietrich J., Bodirsky B., Weindl I. et al. MAgPIE – An Open Source Land-Use Modeling Framework. Version 4.6.0, 2022, DOI:0.5281/zenodo.1418752.
14. Pan J., Cross J., Zou X., et al. To tax or to trade? A Global Review of Carbon Emissions Reduction Strategies, Energy Strategy Reviews, 2024, vol. 55, 101508, DOI:10.1016/j.esr.2024.101508.
15. Kotlikoff L., Kubler F., Polbin A., et al. Can today's and Tomorrow's World Uniformly Gain From Carbon Taxation?, European Economic Review, 2024, vol. 168, 104819, DOI:10.1016/j.euroecorev.2024.104819.

16. Лобова С.В. Обзор исследований Большого Алтая: библиометрическо-картографический анализ / С.В. Лобова // Профессорский журнал. Серия: Экономические науки, 2024. – №2 (2).
17. Havl'ík P., Valin H., Herrero M., et al. Climate Change Mitigation Through Livestock System Transitions. PNAS, 2014, vol. 111, no. 10, pp. 3709-3714. DOI:10.1073/pnas.1308044111.
18. Строков А.С. Оценка запасов углерода и компонентов углеродного следа балансовым методом на пахотных землях регионов России / А.С. Строков, А.А. Романовская, В.Ю. Вертянкина, и др. // Метеорология и гидрология, 2023. – № 10. – С. 5-15. – DOI:10.52002/0130-2906-2023-10-5-15.
19. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Распоряжение от 30 июня 2017 г. N 20-р. Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов.
20. Строков А.С. Моделирование регионального развития сельскохозяйственного производства в России с помощью модели GLOBIOM / А.С. Строков, В.Ю. Поташников // Национальная научно-практическая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения А.М. Гатаулина. Сборник статей конференции. Москва, 2021.

Рябов Иван Юрьевич. Аспирант, старший преподаватель кафедры информатики, Институт математики и информационных технологий, Алтайский государственный университет, Барнаул; младший научный сотрудник, Центр агропродовольственной политики Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС). AuthorID: 1185458, ORCID: 0000-0002-9076-237X, Scopus ID: 58993009300, SPIN: 4151-5981, ivan.ryabov.y@mail.ru, Россия, Москва.

Понькина Елена Владимировна. Кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической кибернетики и прикладной математики, Институт математики и информационных технологий, Алтайский государственный университет. AuthorID: 231357, ORCID: 0000-0001-7604-6337, Scopus ID: 57188723366, ResearcherID: Q-9488-2016, SPIN: 9474-6242, ponkina@math.asu.ru, Россия, Барнаул.

Строков Антон Сергеевич. Кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, Центр агропродовольственной политики Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС). AuthorID: 624128, ORCID: 0000-0002-3784-4974, Scopus ID: 55646277400, SPIN: 8273-7409, strokov-as@ranepa.ru, Россия, Москва.

UDC 51-77, 519.868, 322

DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.012

Situational modeling of opportunities for achieving strategic goals by Russian agriculture: analysis at the national and regional levels

Ivan Yu. Ryabov^{1,2}, Elena V. Ponkina¹, Anton S. Strokov²

¹Altai state university, Russia, Barnaul, ivan.ryabov.y@mail.ru

²Center for agrifood policy of the Russian Presidential academy of national economy and public administration (RANEPA), Russia, Moscow

Abstract. Situational modelling makes it possible to analyze and predict the “behavior” of organizational systems under different conditions. One of the key tools in this area are models of the dynamics of socio-economic systems. Models describing the processes of Land Use Change (LUC) allow us to study both the dynamics of regional development under certain climatic and socio-economic scenario conditions and the prospects and possible consequences of achieving long-term strategic goals of agricultural development. We employed a recursive model of agricultural land use dynamics “GLOBIOM” for situational modelling of the achievement of carbon neutrality by Russian agriculture in the case of two scenarios: inertial socio-economic development under the SSP2 scenario without special taxes on greenhouse gas (GHG) emissions and with the introduction of a tax per unit of GHG emissions. The results of the situational modelling provide an informational basis for understanding the prospects of achieving carbon neutrality of the Russian agriculture under the considered interventions, which is relevant for the development of the national agricultural policy. In addition, modelling at the regional level allows us to reveal the possible consequences for regional agriculture, in particular changes in agricultural production, land use, and

farmland distribution. Among the Russian regions, the study focused on the Greater Altai regions (Altai Krai, Altai Republic, and Tyva Republic), where Altai Krai represents a large agro-industrial region with the largest carbon footprint from agricultural production in the country, and Altai and Tyva are ethnic republics with less pronounced agricultural potential and a greater focus on livestock development. The modelling period is 2030-2050.

Keywords: situational modeling, scenario analysis, agricultural development, GLOBIOM, carbon tax, land use

Acknowledgements: The Russian module of the GLOBIOM model and scenario calculations were carried out under the support of the State Assignment of the Russian Academy of National Economy and Public Administration. The analysis of regional development, regional calculations, and paper writing were funded by the framework of the State assignment “Altai vector of Eurasian economic integration: challenges of cross-border, effects, strategic objectives, and priorities for the Altai region” (FZMW-2023-0015).

References

1. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2024 g. № 309 [Decree of the President of the Russian Federation. No. 309 of 07.05.2024], available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (accessed: 04/01/2025).
2. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 14.05.2021 g. № 731 [Resolution of the Government of the Russian Federation. No. 731 of 14.05.2021], available at: <http://government.ru/docs/all/134619/> (accessed: 04/01/2025).
3. Federal'nyj zakon “Ob ogranichenii vybrosov parnikovyh gazov” ot 02.07.2021 g. № 296-FZ. [Federal Law “On Limitation of Greenhouse Gas Emissions” dated 02.07.2021 No. 296-FZ.], available at: <http://government.ru/docs/all/135381/> (accessed: 04/01/2025).
4. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 26.10.2023 g. № 812. Ob utverzhdenii Klimaticheskoy doktriny Rossijskoj Federacii [Decree of the President of the Russian Federation. No. 812 of 26.10.2023. On Approval of the Climate Doctrine of the Russian Federation], available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910> (accessed: 04/01/2025).
5. Rjabov I.Ju., Pon'kina E.V., Strokov A.S. Perspektivy uglerodnoj nejtral'nosti v sel'skom hozjajstve Rossii po scenarijam SSP: analiz na urovne strany i regiona [Prospects of Carbon Neutrality in Russian Agriculture According to SSP Scenarios: Analysis at the National Level and in a Region]. *Prostranstvennaja jekonomika* [Spatial Economics], 2024, vol. 20, no. 1, pp. 26-62, DOI:10.14530/se.2024.1.026-062.
6. Caregradskaja M. M., Vjazova V. D. Ocenka izmenenija balansa parnikovyh gazov v atmosfere na osnove kompleksnoj geoinformacionnoj prostranstvenno raspredelennoj sistemy monitoringa [Evaluation of Change of Parnique Gas Balance in the Atmosphere on the Basis of Complex Geoinformation Space-Distributed Monitoring System]. *Vestnik nauki i obrazovanija* [Bulletin of Science and Education], 2023, no. 3 (134).
7. Sharkova A. Lemm E. Modeling a Structure of the Fuel and Energy Balance of a Region in the Context of Applying the Concept of Sustainable Development to Achieve Strategic Indicators of Regional Development. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*, 2022, no. 13, pp. 513-531, DOI: 10.18184/2079-4665.2022.13.3.513-531.
8. Denmark is First Country to Tax Agriculture Emissions, Climate Adaptation, 2024, available at: <https://climateadaptationplatform.com/denmark-is-first-country-to-tax-agriculture-emissions/> (accessed: 04/01/2025).
9. Sergeeva N.V. Uglerodnyy nalog: perspektivy primeneniya i vyzovy dlya rossiyskoj ekonomiki [Carbon Tax: Prospects for Application and Challenges for the Russian Economy]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo* [Economics. Taxes. Law], 2023, no. 3.
10. Mezhdunarodnyye podkhody k uglerodnomu tsenoobrazovaniyu [International approaches to carbon pricing]. Departament mnogostoronnego ekonomicheskogo sotrudnichestva minékonómrazvitiya Rossii [Department of Multilateral Economic Cooperation of the Ministry of Economic Development of Russia], 2021, available at: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c13068c695b51eb60ba8cb2006dd81c1/13777562.pdf> (accessed: 04/01/2025).
11. Global Biosphere Management Model (GLOBIOM). Integrated Biospheres Futures, International Institute for Applied Systems Analysis (IBF-IIASA). Laxenburg, 2023, 84 p., available at: https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/18996/1/GLOBIOM_Documentation.pdf (accessed: 01/2025).
12. Britz W., Witzke P. CAPRI Model Documentation 2014, 2014, available at: <https://www.capri-model.org/lib/exe/fetch.php?media=docs:capri-documentation.pdf> (accessed: 04/10/2025).
13. Dietrich J., Bodirsky B., Weindl I. et al. MAgPIE – An Open Source Land-Use Modeling Framework. Version 4.6.0, 2022, DOI:0.5281/zenodo.1418752.
14. Pan J., Cross J., Zou X., et al. To Tax or to Trade? A Global Review of Carbon Emissions Reduction Strategies, *Energy Strategy Reviews*, 2024, vol. 55, 101508, DOI:10.1016/j.esr.2024.101508.
15. Kotlikoff L., Kubler F., Polbin A., et al. Can Today's and Tomorrow's World Uniformly Gain from Carbon Taxation? *European Economic Review*, 2024, vol. 168, 104819, DOI:10.1016/j.euroecorev.2024.104819.

16. Lobova S.V. Obzor issledovaniy Bol'shogo Altaya: bibliometrichesko-kartograficheskiy analiz [Review of Studies on the Great Altai: A Bibliometric and Cartographic Analysis]. Professorskiy zhurnal. Seriya: Ekonomicheskiye nauki [Professor Journal. Series: Economic Sciences], 2024, no. 2 (2).
17. Havl'ik P., Valin H., Herrero M., et al. Climate Change Mitigation Through Livestock System Transitions. PNAS, 2014, vol. 111, no. 10, pp. 3709-3714. DOI:10.1073/pnas.1308044111.
18. Stokov A.S., Romanovskaya A.A., Vertyankina V.Yu., et al. Otsenka zapasov ugleroda i komponentov uglerodnogo sleda balansovym metodom na pakhotnykh zemlyakh regionov Rossii [Assessment of Carbon Stocks and Carbon Footprint Components by the Balance Method on Arable Lands in the Regions of Russia]. Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology], 2023, no. 10, pp. 5-15.
19. Ministerstvo prirodnkh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii. Rasporyazheniye ot 30 iyunya 2017 g. N 20-r. Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazaniy po kolichestvennomu opredeleniyu ob'yema pogloshcheniya parnikovyykh gazov [Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Order No. 20-r of June 30, 2017. On the approval of methodological guidelines for the quantitative determination of the volume of greenhouse gas absorption].
20. Stokov A.S., Potashnikov V.Yu. Modelirovaniye regional'nogo razvitiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva v Rossii s pomoshch'yu modeli GLOBIOM [Modeling the Regional Development of Agricultural Production in Russia Using the GLOBIOM Model]. Natsional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 85-letiyu so dnya rozhdeniya A.M. Gataulina. Sbornik statey konferentsii [National Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the birth of A.M. Gataulin. Conference proceedings]. Moscow, 2021.

Ivan Yurievich Ryabov. Postgraduate, Senior Lecturer, Department of Informatics, Institute of Mathematics and Information Technologies, Altai State University, Barnaul, Russian Federation; Research Assistant, Center for Agrifood Policy of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA). AuthorID: 1185458, ORCID: 0000-0002-9076-237X, Scopus ID: 58993009300, SPIN: 4151-5981, ivan.ryabov.y@mail.ru, Russia, Moscow.

Elena Vladimirovna Ponkina. Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, Department of Theoretical Cybernetics and Applied Mathematics, Institute of Mathematics and Information Technologies, Altai State University. AuthorID: 231357, ORCID: 0000-0001-7604-6337, Scopus ID: 57188723366, ResearcherID: Q-9488-2016, SPIN: 9474-6242, ponkina@math.asu.ru, Russia, Barnaul.

Anton Sergeevich Stokov. Candidate of Sciences (Economics), Head Scientist Researcher, Center for Agrifood Policy of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA). AuthorID: 624128, ORCID: 0000-0002-3784-4974, Scopus ID: 55646277400, SPIN: 8273-7409, stokov-as@ranepa.ru, Russia, Moscow.

Статья поступила в редакцию 15.04.2025; одобрена после рецензирования 17.05.2025; принята к публикации 26.08.2025.

The article was submitted 04/15/2025; approved after reviewing 05/17/2025; accepted for publication 08/26/2025.