



В И А П И

им. А.А. Никонова

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ

**Всероссийский Институт
Аграрных Проблем и Информатики
им. А.А. Никонова – филиал
ФГБНУ ФНЦ ВНИЭСХ**

2025

Выпуск 57

**МОДЕЛИ И СЦЕНАРИИ НИЗКО УГЛЕРОДНОЙ
ТРАНСФОРМАЦИИ АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ
СИСТЕМ РЕГИОНОВ РОССИИ**

Москва – 2025

УДК 631: 338.431.7: 551.58

Ром–69

Рецензенты:

д-р. экон. наук, профессор **С. Б. Огнивцев**

д-р. экон. наук **В. М. Сарайкин**

Под редакцией д-ра экон. наук С. О. Сиптица

Коллектив авторов: Романенко И.А. (Введение, разделы 3.1, 3.2, Заключение, Приложение А), Сиптиц С.О. (разделы 1.2, 2.1, 2.2, 3.3, Приложение Б), Евдокимова Н.Е. (разделы 1.1, 3.1)

Модели и сценарии низко углеродной трансформации агропродовольственных систем регионов России: Научн. тр. ВИАПИ им. А. А. Никонова, Вып. 57. — М.: б/и, 2025. — 132 с.

ISBN 978-5-6052068-8-0

Предметом исследования являются методы и модели для определения количественных характеристик и сценариев низко углеродной трансформации региональных агропродовольственных систем в условиях возможных климатических изменений. Рассмотрены сценарии эффективного землепользования при сохранении экологической и социальной устойчивости агропродовольственных систем регионов России.

УДК 338.26/.28; 339.97

ISBN 978-5-6052068-8-0 © Романенко И.А., Сиптиц С.О., Евдокимова Н.Е., 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 Математические модели для разработки и анализа политики низко углеродного развития	10
1.1 <i>Зарубежный опыт</i>	10
1.2 <i>Экономико-математическая модель низко углеродной трансформации АПС Российской Федерации с учетом региональных особенностей</i>	24
2 Описание структуры и функций информационно-аналитической системы низко углеродной трансформации АПС региона, апробация системы на региональной информации	41
2.1 <i>Структура и функции информационно-аналитической системы, интерфейс системы</i>	41
2.2 <i>Апробация системы на региональной информации</i>	51
3 Комплексный анализ полученных результатов с учетом критериев эффективности и устойчивости региональных АПС с точки зрения продовольственной безопасности России в целом	66
3.1 <i>Методика оценки эколого-экономической эффективности отраслей животноводства в регионах России</i>	67
3.2 <i>Сравнительный анализ результатов расчетов с помощью системы «Декарбон СХ» по трем сценариям развития АПС России до 2035 года: «Базовый», «Инерционный», «Целевой»</i>	81

<i>3.3 Анализ устойчивости стратегий низко углеродной трансформации АПС регионов в зависимости от планируемых нагрузок по снижению углеродного следа их функционирования</i>	<i>96</i>
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	127

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Агропродовольственная система (АПС) региона – совокупность производителей агропродовольственной продукции, локализованных на определенной территории, находящихся в состоянии взаимодействия и обмена с внешней средой, образующих целостную систему, целью функционирования которой является обеспечение потребителей продовольствием при сохранении эффективности и устойчивости ее функционирования

Устойчивость продовольственной системы России в процессе низкоуглеродной трансформации – понимается как способность достижения самообеспеченности продовольствием населения на уровне рекомендованных медицинских норм здорового и полноценного питания, снижения межрегиональной дифференциации в физической и экономической доступности продовольствия при сохранении неотрицательного баланса органического вещества почв, используемых при производстве продукции сельского хозяйства

Эффективность АПС – понимается как способность к достижению поставленных целей в процессе трансформации

Информационно-аналитическая система для оценки процесса трансформации АПС регионов с учетом критериев эффективности устойчивости – комплекс методов, моделей, баз данных и программных инструментов для оценки влияния деятельности АПС регионов на следующие показатели: валовой доход регионов России от сельскохозяйственной деятельности, региональный баланс органического вещества почв в процессе землепользования, объём эмиссии парниковых газов от растениеводства и животноводства, а также на изменения важных социальных индикаторов, таких как степень обеспеченности продовольствием населения регионов в соответствии с медицинскими нормами здорового питания за счет собственного производства

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АПС – агропродовольственная система
- GEMINI-E3 – модель общего равновесия международно-национального взаимодействия экономики, энергетики и окружающей среды (General Equilibrium Model of International-National Interactions between Economy, Energy and the Environment)
- ИМПАКТ – международная модель анализа политики в области сельскохозяйственных товаров и торговли (International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade)
- RCP – репрезентативные траектории концентраций: климатический сценарий антропогенного воздействия (Representative Concentration Pathway)
- МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change)
- IFSM – интегрированная модель фермерского хозяйства (Integrated Farm System Model), иначе, модель FARM
- GLOBIOM – глобальная модель управления биосферой (GLObal BIOsphere Management model)
- AROPAj – Европейская агроэкономическая модель
- ЭПГ – эмиссия парниковых газов
- LCA – оценка жизненного цикла (Life-cycle assessment)

ВВЕДЕНИЕ

Экономическая ситуация, сложившаяся в настоящее время, настоятельно требует, чтобы достижение целей Стратегии социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. не создавало несоразмерных обременений для нашей страны и было сбалансированным. Сформировалась настоятельная потребность в создании отечественных цифровых активов по сбору и анализу углеродной отчетности и инструментов по разработке стратегий низкоуглеродного развития отраслей экономики при соблюдении критериев устойчивости и эффективности. Поскольку сельскохозяйственное землепользование сопряжено с обеспечением продовольственной безопасности России и воспроизводством почвенного плодородия сельхозугодий, то это также надо учитывать при разработке такого инструментария. Такую функциональную задачу усугубляют климатические изменения. В итоге, встает довольно сложная проблема поиска компромиссных решений, которая требует разработки аналогичной сложности проблемы методологии и соответствующего цифрового инструментария проектирования эффективных и устойчивых региональных АПС с возможно низким уровнем ЭПГ. Самые разные способы решения этой задачи предлагаются современным научным сообществом, тем не менее, сохраняется методологическая необходимость в оптимизации компромисса между углеродным следом и экономической эффективностью аграрного производства в стохастической среде, образованной динамикой изменения климата и экономических экстерналий. Эти внешние по отношению к АПС факторы могут быть заданы только с некоторой степенью определенности, а из-за этого остается актуальным вопрос об устойчивости получаемых

компромиссных решений. Понятно, что поиск таких компромиссов должен осуществляться в некотором процессе, что мы станем называть проектированием АПС региона. Итогом такого процесса будет эффективная конструкция АПС, определяющая размер, отраслевую структуру и технологические способы производства. Разработка методологического базиса трансформации АПС, создание на этой основе моделей их функционирования, информационно-вычислительного инструментария, дает возможность отработать технологию проектирования регуляторов, реализующих целевые установки, связанные с трансформацией АПС в соответствии с концепцией низко углеродной экономики с учетом критериев социальной, экологической и экономической эффективности. Разработка такого инструментария, безусловно, является актуальной научной проблемой.

Цель исследования – обосновать методологию и апробировать модельный инструментарий для описания процессов низко углеродной трансформации АПС, разработать на этой основе информационно-аналитическую систему для проектирования эффективных и устойчивых АПС с низким углеродным следом с учетом эколого-экономических и социальных критериев.

Методология проектирования эффективных и устойчивых АПС с низким углеродным следом базируется на системном анализе, теории оптимального управления динамическими системами, теории и методах принятия решений в системах управления с несколькими критериями, научно установленных закономерностях в растениеводстве и в животноводстве, связанных с ЭПГ.

1 Математические модели для разработки и анализа политики низко углеродного развития

1.1 Зарубежный опыт

Многие страны приняли программы сокращения выбросов углерода, которые дорабатываются и расширяются на опыте их практической реализации. Помимо регулирования, налогообложения и субсидий, у государства есть еще один способ реализации климатической политики и сокращения выбросов парниковых газов: рынок квот на выбросы (или «права на загрязнение»). Идея рынка квот на выбросы родилась в 1960-е гг. после работы американского экономиста Рональда Коуза (1910-2013, Нобелевская премия по экономике 1991 года). Ее принцип заключается в следующем: государство устанавливает максимально допустимый уровень загрязнения на территории. Цена квоты определяется на рынке исходя из предложения и спроса на квоты. Если компании планируют загрязнять больше, чем разрешенное количество, они покупают разрешения, тем самым вызывая увеличение спроса. Однако при прочих равных условиях такое увеличение спроса приведет к увеличению цены квоты, что побудит компании проводить больше экологических мероприятий. Наоборот, если фактические выбросы ниже общих квот, то цена квоты будет снижена [1].

Для достижения поставленных целей по сокращению выбросов загрязняющих веществ можно просто в динамике снижать общий разрешенный размер квот. Назначая цену за загрязнение, рынок квот на выбросы заставляет компании-загрязнители учитывать стоимость загрязнения, которое они производят.

Тем не менее, эта система имеет пределы [1]. Во-первых, сокращение выбросов CO₂ происходит только в тех случаях, когда оно обходится недорого. В других случаях компании предпочитают продолжать загрязнять окружающую среду. Более того, его реализация затруднена в той степени, в которой «справедливый уровень» права на загрязнение для всей экономики не должен быть слишком низким, чтобы не препятствовать экономической активности, и не должен быть слишком высоким, чтобы оказывать реальное влияние на загрязнение. Наконец, создание рынка квот на выбросы в определенном географическом регионе может побудить компании переместить свое производство в районы или страны, в которых его нет.

Разработка политики в области сокращения выбросов углерода требует изучения таких пределов и последствий введения квот на выбросы углерода. Основным инструментом таких исследований являются математические модели.

Предельные затраты на снижение выбросов парниковых газов фактически равны затратам, связанным с внедрением новых методов, дефициту (или альтернативным издержкам), связанным с перераспределением ресурсов (в связи, например, с изменением севооборота и/или количества животных), а также возможные затраты на корректировку и/или транзакцию. Кроме того, изменения в предложении в результате сокращения выбросов могут иметь макроэкономические последствия для рынков и цен, в свою очередь, изменяя альтернативные издержки, связанные с определенными видами деятельности.

Таким образом, предельные затраты на смягчение последствий не могут быть выведены исключительно на основе учетной информации. Это обосновывает использование моделей. Среди

стратегий, разработанных с помощью моделей в современной научной литературе, выделяют три основные категории подходов.

Первая категория соответствует классу экономических моделей сельскохозяйственного снабжения. Ее примеры практической реализации представлены в работах [2, 3]. Эти модели микроэкономического характера описывают поведение фермеров с точки зрения севооборота, управления посевами, размера стада и практики разведения, исходя из гипотезы, что фермеры максимизируют свою прибыль с учетом экономических параметров (цена на продукцию, затраты, помощь и так далее) и при наличии определенного количества технических и политических ограничений. Интегрируя «цену» выбросов в цель каждого представленного фермера, эти модели описывают эффективный ответ с точки зрения сокращения выбросов. Основываясь на гипотезе максимизации прибыли, они учитывают упомянутые выше микроэкономические компромиссы, которые приводят к уравниванию предельных затрат на смягчение последствий и цены выбросов. Варьируя цену выбросов и сравнивая ее с количеством сокращенных выбросов, эти модели описывают кривые предельных затрат на смягчение последствий (индивидуальных и/или на более совокупном уровне) для группы репрезентативных фермеров. Учитывая структуру модели этого типа, эти кривые необходимо интерпретировать в заданном экономическом (цены на ресурсы и продукцию) и технологическом (отраженном техническими ограничениями) контекстах. Благодаря явному учету разнообразия условий производства для набора агентов, этот тип подхода адаптирован для анализа последствий неоднородности потенциалов и индивидуальных затрат на смягчение последствий при определении инструментов политики смягчения.

Вторая категория объединяет модели частичного или общего равновесия [4, 5]. Оценка предельных затрат на смягчение последствий в моделях этой категории разделяет некоторые принципы, изложенные выше. В частности, модели предложения и равновесия имеют общее предположение о рациональности агентов, что приводит к равенству между предельными затратами на смягчение последствий и ценой выбросов. Однако, в отличие от моделей предложения, модели равновесия включают описание спроса на сельскохозяйственную продукцию, а также представление корректировок цен и равновесия на рынках. Таким образом, модели этой категории интегрируют эффект обратной связи цен на предельные затраты на смягчение последствий. Модели баланса характеризуются более широким географическим охватом (часто глобальным), но, как правило, более низким разрешением и менее подробным техническим содержанием, чем модели предложения.

Третий подход, используемый в литературе для оценки предельных затрат на смягчение последствий, основан на «инженерной» логике. Исследования, основанные на этой последней категории моделей, на первом этапе собирают техническую и научную информацию, связанную с комплексом действий, направленных на сокращение выбросов, например, работы [5, 6]. Таким образом, для каждого сценария расчетов собирается информация о техническом потенциале общего смягчения, а также о требуемых затратах. Средняя стоимость смягчения последствий, связанная с каждым рассматриваемым сценарием, затем рассчитывается как соотношение между его общей стоимостью и потенциалом смягчения последствий. Эта стоимость единицы выбросов представляет собой минимальную оценку (в евро за тонну в CO₂-эквиваленте), необходимую для того,

чтобы проект был прибыльным. Кривые предельных затрат на смягчение последствий получаются путем классификации сценариев в направлении увеличения удельной стоимости смягчения последствий и сравнения этих затрат и совокупного потенциала смягчения. Следует отметить, что для данной схемы предельные затраты, таким образом, приравниваются к средним затратам на сценарий и считаются постоянными в зависимости от количества предотвращенных выбросов, отсюда и ступенчатая форма кривых предельных затрат, полученная с помощью этого подхода.

Последний подход основан на логике, которая является скорее бухгалтерской, чем экономической. В частности, в отличие от первых двух подходов, он не требует явного предположения о рациональном поведении экономических агентов. Важным следствием является то, что в исследованиях такого типа ничто не мешает прийти к мерам, позволяющим, как сократить выбросы парниковых газов, так и повысить доходы агентов.

Эти три подхода также различаются по типу действий по смягчению последствий, которые можно применить. Определенного сокращения выбросов можно добиться за счет перераспределения ресурсов, используемых в производстве (сокращение использования ресурсов, изменение севооборота и так далее), не обязательно требуя радикального изменения технологии. Экономические модели, основанные на предположении о стабильности всех производственных возможностей, позволяют относительно легко интегрировать варианты такого типа. Другие, однако, являются результатом внедрения новых практик и/или инвестиций в новые технологии. Последние легче учесть в подходах «инженерного» типа. Кроме того, они также упрощают, по сравнению с экономическими моделями, учет действий, которые в

настоящее время не реализуются, но для которых имеются технические ссылки.

Выбросы парниковых газов сельскохозяйственного происхождения характеризуются многочисленными взаимодействиями между источниками. В качестве иллюстрации можно отметить, что численность животных влияет как на выбросы, связанные с кишечной ферментацией, так и на выбросы, связанные со сбросом отходов животноводства, а также на ротацию (в частности, на распределение зон, предназначенных для корма для животных и людей), и, следовательно, на количество животных. поступления азота и выбросов N_2O из сельскохозяйственных почв. Более того, некоторые действия по смягчению последствий являются взаимоисключающими, поскольку они требуют использования одних и тех же ресурсов (например, земли). Модели предложения могут учитывать взаимодействия, происходящие на уровне фермы, путем явного учета ограничений по площади и/или ограничений, связанных с кормами для животных. Другие взаимодействия связаны с игрой рынков. Таким образом, сокращение использования азота может привести к сокращению поставок определенных продуктов и, следовательно, к увеличению их цен с возможными последствиями для других производств (например, для животноводства). Такие взаимодействия учитываются эндогенно в равновесных моделях. Аналитический подход (действие за действием), который характеризует подходы «инженерного» типа, делает анализ взаимодействий менее простым. Это требует обеспечения *ex post* общей согласованности осуществляемых действий как с точки зрения воздействия на затраты и потенциала смягчения последствий, так и с точки зрения использования ресурсов. Этот аспект не всегда четко документирован в доступных исследованиях [6, 7].

Наконец, очевидно, что выбранный масштаб и методы расчета, используемые для подсчета выбросов, играют роль в оценке потенциала и затрат на смягчение последствий. Некоторые исследования ограничиваются выбросами из подотрасли АПК. Другие учитывают только сельскохозяйственные выбросы N_2O и CH_4 . Некоторые исследования также включают выбросы, связанные с изменениями в землепользовании и/или выбросы, вызванные сжиганием ископаемого топлива. Другие расширяют сферу охвата выбросов и учитывают ЭПГ от вызванных добычей или переработкой ископаемого топлива, тем самым отклоняясь от логики кадастров и приближаясь к логике анализа жизненного цикла продукта.

Методы учета выбросов также различаются в зависимости от исследований. Некоторые придерживаются методов по умолчанию, предложенных МГЭИК, тогда как другие используют более сложные взаимосвязи или модели. Эти различия иногда затрудняют прямое сравнение результатов разных исследований.

Чтобы прояснить сравнение результатов, основанных на различных гипотезах, исследователи в работе предлагают мета-анализ оценок, доступных в литературе [8]. Такой статистический подход позволяет контролировать влияние основных гипотез, сохраняемых в существующих исследованиях по оценке затрат на снижение выбросов сельскохозяйственного происхождения. Таким образом, расчетная метамодель позволяет описать взаимосвязь между сокращением выбросов, полученным во всех доступных исследованиях, и ценой выбросов с учетом конкретных характеристик каждого исследования. Результаты этого мета-анализа выделяют, в частности, влияние использованного метода на оценку затрат на смягчение последствий. В частности, подходы «инженерного» типа приводят, при прочих равных

условиях, к наиболее оптимистичным результатам. И наоборот, микроэкономические модели предложения, основанные на относительно консервативных предположениях (отсутствие отрицательных затрат, стабильность существующих технологий и сельскохозяйственных структур, ограниченное количество доступных рычагов смягчения последствий), обычно приводят к более низким возможностям снижения выбросов для данной цены на объемы этих выбросов.

Рассмотрим подробнее возможности наиболее часто используемых моделей для разработки мер регулирования рынков углеродных единиц.

GEMINI-E3 – это многострановая, многосекторная, рекурсивная вычисляемая модель общего равновесия. Модель специально разработана для анализа изменения климата и энергетической политики. Она моделирует все основные отраслевые рынки, национальные и международные, рассматриваемые в предположении их функционирования в режиме совершенной конкуренции. Периоды времени связаны в модели через эндогенные реальные процентные ставки, определяемые через балансировку сбережений и инвестиций. Национальные и региональные модели связаны эндогенными реальными обменными курсами, возникающими из-за ограничений на дефицит или излишек внешней торговли. Существует одно исключение из этого общего предположения о совершенной конкуренции, которое касается внешней торговли. Товары одного и того же сектора, производимые разными странами, не должны быть совершенно конкурентоспособными; они рассматриваются как экономически разные товары, более или менее взаимозаменяемые в соответствии с эластичностью замещения,

известной как предположение Армингтона. Основные результаты модели GEMINI-E3 рассчитываются по странам и ежегодно: налоги на выбросы углерода, предельные издержки на снижение выбросов и цены на продаваемые разрешения, эффективное снижение выбросов CO₂, чистые продажи продаваемых квот, общие чистые потери благосостояния и их компоненты, макроэкономические агрегаты, реальные обменные курсы и реальные процентные ставки, а также данные на отраслевом уровне (например, изменение производства и факторов производства, а также цен на товары). Модель также вычисляет выбросы парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O и фторированные газы).

На протяжении более чем 20 лет GEMINI-E3 широко используется для моделирования национальной и международной политики в области климата. С использованием GEMINI-E3 было сделано более 20 научных публикаций.

ИМПАСТ – это глобальная мультирыночная экономико-математическая модель частичного равновесия. ИМПАСТ сфокусирована на симуляции экономики глобальной АПС, а именно, процессах спроса-предложения, международной торговли и ценообразования, которые балансируют мировые агропродовольственные рынки. Основная экономическая модель связана с рядом «модулей», которые включают модели климата Земли (ESM), модели имитации управления водными ресурсами и имитации роста культурных растений (DSSAT), модели цепочки создания стоимости (например, масла, сахар, скот) и землепользования на уровне пикселей по регионам. Водные модели в системе моделирования ИМПАСТ включают:

1) глобальную гидрологическую модель IMPACT (IGHM), которая моделирует процессы накопления и таяния снега, а также стока осадков;

2) имитационную модель водного бассейна IMPACT (IWSM), которая моделирует оптимальное управление запасами воды в речных бассейнах для удовлетворения потребностей экономических секторов, включая орошаемое земледелие;

3) модель распределения и стресса для сельскохозяйственных культур IMPACT (ICWASM), которая распределяет имеющуюся чистую оросительную воду между сельскохозяйственными культурами и оценивает влияние нехватки воды на урожайность.

Модель IMPACT неоднократно использовалась для оценки потенциала снижения выбросов парниковых газов от сельского хозяйства при сценарных объемах финансирования и темпах научно-технического прогресса в отрасли. Действительно, трудно оценить будущие выбросы в сельскохозяйственном секторе, отделяя сельскохозяйственное производство от условий его функционирования: потенциал смягчения последствий изменения климата более точно определяется при системном, глобальном подходе. Модель IMPACT использует также данные, полученные при расчетах на основе модели FARM.

FARM (IFSM) разработана в отделе сельскохозяйственных исследований Минсельхоза Соединенных Штатов. Это биофизическая динамическая комплексной оценки модель сельского хозяйства, которая используется для оценки последствий управленческих решений стратегического масштаба и технологической направленности. FARM симулирует воздействие аграрного производства на окружающую среду, включая атмосферу, почву, отходы, включая LCA по каждому

продукту с целью оценки их углеродного следа. Процессно-ориентированная имитационная модель FARM моделирует все основные компоненты хозяйства в виде процесса, позволяя пользователям дополнять ее и совершенствовать. Имитация производств различных уровней и структур дает особую возможность проводить комплексную оценку агроэкологических последствий (преобразования и потери C, N и P) и экономических результатов принятых и планируемых мер управления и сравнивать их воздействие на эффективность и устойчивость моделируемого производства.

GLOBIOM является изначально моделью частичного равновесия (уравновешивая спрос-предложение на рынках), созданной в начале нашего века в Международном институте прикладного системного анализа (IIASA), которая применялась для решения задач, связанных с оценкой снижения ЭПГ в разных странах, в том числе, в Китайской Народной Республике [9, 10] и в Российской Федерации [11]. Она представляет базовые сектора землепользования, в том числе, лесное и сельское хозяйство. В работе [12] отмечены следующие особенности модели GLOBIOM: «Предложение в модели строится снизу (пространственно описанная поверхность планеты, землепользование, системы управления и информация об экономических затратах) вверх (региональные товарные рынки). Такая структура позволяет учитывать широкий набор экологических и социально-экономических параметров. Для сельскохозяйственных культур, домашнего скота и лесной продукции включены производственные функции Леонтьева, охватывающие альтернативные системы производства, которые параметризуются на биофизических моделях, таких как EPIC или G4M. GLOBIOM охватывает выбросы основных парниковых газов в результате сельского, лесного и другого

землепользования. Кроме того, модель эндогенно представляет технологии смягчения последствий изменения климата, включая технологические и структурные варианты. Товарные рынки и международная торговля моделируются для 37 агрегированных экономических регионов. Торговля моделируется в соответствии с подходом пространственного равновесия, основанным на конкурентоспособности затрат и предположении об однородности товаров, что позволяет отслеживать двусторонние торговые потоки между отдельными регионами. GLOBIOM - это рекурсивно-динамическая модель, которая может прогнозировать до 2100 года. Модель была первоначально разработана для оценки воздействия политики смягчения последствий изменения климата, а в настоящее время все чаще применяется для прогнозирования агро-лесных рынков, анализа экономических последствий изменения климата и адаптации, а также целей устойчивого развития.» [12]

Европейская агроэкономическая модель AROPAj это технико-экономическая модель статической оптимизации производства сельскохозяйственной продукции в Европейском Союзе, которая в основном фокусируется на взаимосвязях между сельским хозяйством и окружающей средой, агроэкологической политике и оценке стимулов для смягчения последствий изменения климата и адаптации к ним. В дополнение к эконометрическим подходам, опирающимся на историческую информацию, модель представляет новые подходы математического программирования, использующие данные сети бухгалтерского учета ферм (FADN). Модель также предназначена для оценки последствий глобальных изменений и анализа политики с учетом сложности взаимодействия между сельским хозяйством и окружающей средой. В этом отношении это инструмент, используемый

для анализа широкого спектра экономических и экологических областей, таких как выбросы парниковых газов и борьба с ними, загрязнения, вызванные азотом, получение биомассы из многолетних культур, воздействие озона и адаптация к изменению климата. Интерес к объединению экономической модели AROPAj с биофизическими моделями связан с возможностью учета экологических (физических воздействий, таких как почва и климат) и технических переменных воздействий на производственные функции, а также на продукцию сельскохозяйственной системы, имеющую отношение к экологическим проблемам [13]. Общая цель состоит в том, чтобы выявить взаимосвязь между затратами на растениеводство (например, внесение удобрений) и результатами растениеводства (например, урожайностью). Потенциальную взаимосвязь между экономическими и биофизическими моделями можно найти в методах управления фермера, таких как орошение, применение пестицидов и удобрений. Некоторые уточнения необходимы, когда оптимальное решение группы ферм состоит в использовании нетоварной продукции растениеводства (или нетоварного поступления азота). Другими словами, это происходит, когда, в оптимальном случае, продукция растениеводства полностью повторно используется на ферме (например, для кормления скота) или, когда N-вход не поступает с рынка (например, из навоза). В этом случае рыночные цены должны быть заменены соответствующими теневыми ценами, которые являются частью оптимального решения. Модель работает с использованием программного обеспечения и приложений GNU, за исключением продаваемого инструмента решения оптимизации (GAMS). Год за годом был сделан выбор в пользу продвижения использования программного обеспечения GNU для улучшения AROPAj, не только с точки зрения финансовых затрат, но

главным образом для облегчения поддержки и развития наших программ и приложений [13]. Модель также дает некоторые интересные результаты с пространственным разделением, соответствующие многомасштабным экологическим проблемам.

Выводы. Научные исследования с помощью математического моделирования совершенствования мер регулирования ЭПГ от сельского хозяйства в атмосферу – тема все возрастающего по объему числа научно-исследовательских и прикладных публикаций во всем мире. Научные публикации последних лет [7] сходятся в том, что есть значительный потенциал снижения эмиссии углерода в сельском хозяйстве, причем затраты на их уменьшение, сопоставимы с аналогичными в других секторах экономики. Также существует вывод большинства результатов моделирования о том, что объем выбросов в аграрной отрасли весьма чувствителен к складывающейся рыночной цене углеродной единицы. Причем, именно ценовые соотношения на рынке обладают высокой эластичностью к потенциалу снижения выбросов.

1.2 Экономико-математическая модель низко углеродной трансформации АПС Российской Федерации с учетом региональных особенностей

Побудительным мотивом для разработки данной экономико-математической модели послужила необходимость описания процессов низко углеродной трансформации региональных АПС с последующим агрегированием результатов и уровня Российской Федерации.

Прежде чем приступить к формулировке экономико-математической модели дадим определения основным понятиям, с помощью которых постараемся ограничить разнообразие всех уместных в данном случае модельных конструкций.

В соответствии с [14] АПС региона – совокупность производителей агропродовольственной продукции, локализованных на определенной территории, находящихся в состоянии взаимодействия и обмена с внешней средой, образующих целостную систему, целью функционирования которой является обеспечение потребителей продовольствием при сохранении эффективности и устойчивости функционирования.

Под низко углеродной трансформацией АПС будем понимать переходный динамический процесс, в ходе которого происходят целенаправленные изменения в структуре землепользования на землях сельскохозяйственного назначения, производственной структуре и технологическом базисе АПС. В качестве синонима будем использовать термин «низко углеродная адаптация АПС».

Цель этой трансформации состоит в максимально возможном снижении углеродного следа АПС, сочетающемся с неотрицательными темпами выпуска продукции. Здесь и далее под углеродным следом АПС будем понимать сумму прямых выбросов CO_2 , N_2O , CH_4 . Можно

предположить, что потенциал низко углеродной трансформации неодинаков и зависит от конкретных свойств региональных АПС.

Для описания процессов низко углеродной трансформации используется динамическая экономико-математическая модель, а достижение целей таких изменений сопряжено с решением задачи оптимального управления соответствующими ресурсами региональных АПС на некотором заданном интервале времени. При этом решается задача в форме Лагранжа (то есть по критерию в виде суммы годовых значений экстремизируемого показателя), а варианты постановок задач оптимального управления должны охватывать следующие случаи:

- минимизация ЭПГ при ограничении снизу на валовой доход АПС,
- максимизация валового дохода АПС при ограничении сверху на ЭПГ,
- максимизация отношения валового дохода к ЭПГ.

Любая из перечисленных постановок может иметь ограничения на управления и фазовые переменные АПС, а также сопровождается оценками самообеспечения населения региона продукцией животноводства. Внешнее окружение модели должно быть представлено ценовой информацией на учитываемую продукцию и факторы производства; для описания частных зависимостей модели используются разнообразные параметры.

Спецификация экономико-математической модели зависит от структуры землепользования, отраслевой структуры региональной АПС, ряда других параметров. При этом особенности ее реализации в разных регионах сводятся к достаточно простым процедурам калибровки с использованием региональных баз данных, которые будут описаны далее. Модель, обладающую такими свойствами, будем называть типовой.

Функциональную структуру типовой модели можно представить в виде следующего макроалгоритма (см. Рисунок 1). Каждая категория земель кроме пашни, и каждый вид сельскохозяйственных животных характеризуется как средними удельными показателями экономической деятельности, так и эмиссией CO_2 , CH_4 , N_2O . Для пахотных земель, для которых соотношение между показателями экономической деятельности и ЭПГ зависит от отраслевой структуры растениеводства, решается соответствующая задача по ее оптимизации. Итак, в структуру типовой модели включены 2 взаимодействующих модуля: динамическая модель углеродной трансформации АПС (блоки 6 и 7) и статическая модель оптимизации отраслевой структуры отраслей растениеводства на пашне (блоки 3 и 4). Кратко опишем содержание каждого блока.

В первом из них задаются начальные значения площадей пахотных земель, многолетних насаждений, пастбищ и сенокосов, залежей и лесных массивов на землях сельхозназначения. Эти характеристики вместе с поголовьем животных являются фазовыми переменными модели, которые могут изменяться во времени под воздействием искомым управлений. Последние задаются как темпы изменений названных переменных модели. В этом же блоке задается демографический прогноз и прогноз среднедушевого потребления продовольствия в регионе. Эти показатели вместе с данными по самообеспеченности продовольствием используются в ограничениях оптимизационных задач в шестом и седьмом блоках. Третий и четвертый блоки предназначены для решения задачи оптимизации структуры площадей, используемых в растениеводстве, с комплексным критерием, состоящем из взвешенной суммы прироста чистого дохода и изменения массы гумуса. Так оценивается объем секвестрации

углерода в почвенном слое. При этом текущие значения пашни вычисляются в процессе решения задачи низко углеродной трансформации АПС.



Источник: разработан авторами

Рисунок 1– Макроалгоритм проведения расчетов с использованием типовой модели низко углеродной трансформации АПС региона

В шестом блоке формируется один из выше перечисленных типов задач оптимизации: выбирается критерий, устанавливаются ограничения на управляющие воздействия и фазовые переменные, опционально могут учитываться технологические особенности,

например, применение ингибиторов уреазы при внесении азотных удобрений, использование посевного материала высших репродукций.

Калибровка модели низко углеродной трансформации АПС (блок 5) предусматривает актуализацию начальных значений фазовых переменных, оценку параметров производственных функций урожайностей сельскохозяйственных культур в зависимости от вносимых доз удобрений, корректировку зависимостей надоев молока в молочном стаде от величины обменной энергии кормовых рационов, использование в форме прогноза региональных данных о мясной продуктивности в отраслях животноводства.

Дадим описание модели оптимизации отраслевой структуры растениеводства АПС региона. Имеем:

$$\begin{aligned}
 & 0,1 \times \sum_{i \in I} \{p_i(t) \times (x_i \times y_i(d_i) - x_i^0 \times y_i^0(d_i^0)) - 0,01 \times \\
 & p_i^f(t) \times (x_i^0 \times D_i^{\text{факт}} - x_i \times D_i^x)\} + q \times \Delta C - 298 \times r \times \\
 & \sum_{i \in I} (EN(D_i^{\text{факт}}) \times x_i^0 - EN(D_i^x) \times x_i) \rightarrow \max, \\
 & \forall t \in [1, T], i \in I
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$y_i(d_i) = y_i^s + (y_i^{\max} - y_i^s) \times (1 - \exp(-\gamma_i \times d_i)), \tag{2}$$

$$d_i = \frac{D_i^x + D_s}{D_i^{\max} + D_s}, \tag{3}$$

$$y_i^s = 0,1 \min \left\{ \frac{N_s k_{Ni}}{\varepsilon_N}; \frac{P_s k_{Pi}}{\varepsilon_P}; \frac{K_s k_{Ki}}{\varepsilon_K} \right\} \tag{4}$$

$$\sum_{i \in I} x_i = \omega, \tag{5}$$

$$\Delta C = \sum_{i \in I} \{[(x_i \times y_i(d_i) - x_i^0 \times y_i^0(d_i^0)) \times b_i + f_i] \times g_i \times ks - 14 \times k_{Ni} \times (x_i \times y_i(d_i) - x_i^0 \times y_i^0(d_i^0)) \times km\} + 0,044 \times H(t), \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} p_i^f(t) \times x_i \times D_i^x = \sum_{i \in I} p_i^f(t) \times x_i^0 \times D_i^{\text{факт}} \quad (7)$$

где I – множество сельхозкультур, возделываемых в АПС региона,

$p_i(t)$ – цена реализации продукции i – го вида, тыс. руб./т,

$p_i^f(t)$ – цена минеральных удобрений, тыс.руб./т

x_i – искомая посевная площадь, тыс. га.,

x_i^0 – фактическая посевная площадь,

ω – площадь пашни, передаваемая из блоков 6-7-8 динамической модели низко углеродной трансформации АПС,

$y_i(d_i)$ – искомая урожайность i – й сельскохозяйственной культуры, т/га,

$y_i^0(d_i^0)$ – фактическая урожайность i – й сельскохозяйственной культуры,

d_i – показатель удобренности,

D_i^x – искомая доза минеральных удобрений i – й сельскохозяйственной культуры в сбалансированном виде, кг/га,

D_i^{max} – максимально допустимая доза минеральных удобрений,

D_s – содержание доступных форм элементов питания растений в почвенном слое, кг/га,

N_s, P_s, K_s – содержание легкогидролизуемого азота, подвижного фосфора и обменного калия в пахотном горизонте почвы, мг/100 гр.,

$\varepsilon_N, \varepsilon_P, \varepsilon_K$ – содержание соответствующих элементов минерального питания в 1 т урожая с учетом побочной продукции,

k_{Ni}, k_{Pi}, k_{Ki} – коэффициенты использования растением соответствующих элементов пищи,

ΔC – изменение секвестрации углерода на пахотных землях вследствие низко углеродной трансформации, т,

b_i, f_i – параметры эмпирической зависимости биомассы корнепоживных остатков от урожайности i –й сельскохозяйственной культуры,

g_i – коэффициент гумификации для данной культуры,

ks – поправочный коэффициент на механический состав почво-грунта,

km – коэффициент минерализации гумуса, зависящий от мехсостава почв,

$H(t)$ – доза органических удобрений, внесенная на единицу площади севооборотного массива за его ротацию,

$EN(*)$ – эмиссия закиси азота (см. (9))

q – весовой коэффициент к объему секвестрации углерода,

r – то же к приросту эмиссии N_2O .

Параметр γ_i оценивается при калибровке модели в соответствии со следующим выражением при подстановке в (2) фактической урожайности и примененной дозы минеральных удобрений:

$$\gamma_i = -\frac{D_i^{max} + D_s}{D_i^{факт} + D_s} \times \ln\left(1 - \frac{y_i^{факт} - y_i^s}{y_i^{max} - y_i^s}\right), \quad (8)$$

при этом величины y_i^{max} и D_i^{max} задаются экспертно.

В данной постановке используется критерий эффективности, равный приросту валового дохода за вычетом затрат на минеральные удобрения (условно: частный маржинальный доход – ЧМД) по отношению к исходной отраслевой структуре АПС и применяемой системе удобрений. К экономической части добавлены два показателя экологической природы: приросты секвестрации углерода и

сокращение эмиссии закиси азота в почвенном массиве АПС; влияние последних на общее решение зависит от весовых коэффициентов.

Задача (1) – (7) решается при двусторонних ограничениях на валовые сборы и дозы удобрений возделываемых культурных растений. Кроме этого предполагается равенство затрат на приобретение минеральных удобрений по факту и в оптимальном решении.

Еще одним поводом для отдельного рассмотрения эффектов от изменения структуры посевных площадей на пашне является зависимость эмиссии закиси азота от вносимых минеральных и органических удобрений под соответствующие культуры. В [15] предложена эмпирическая формула для оценки эмиссии N_2O , а в [16] зависимость верифицирована на фактических данных по Российской Федерации и подтверждена справедливость следующей зависимости:

$$EN = 0,001 \times N \times [6,49 + 0,0187 \times N], \quad (9)$$

где: N – сумма минерального и органического азота, кг/га,

EN – эмиссия N_2O , кг/га/за период вегетации.

Доля азота в дозах минеральных удобрений, вносимых под разные культуры, может быть оценена по данным формы 9-СХ; там же можно найти информацию о внесении органических удобрений и оценить, таким образом, величину органического азота.

Приступим к описанию блоков 6-7 динамической части модели. Ее концепция была сформулирована ранее [17]. В соответствии с этой концепцией процесс низко углеродной трансформации АПС региона представляет собой целенаправленное изменение структуры землепользования на землях сельскохозяйственного назначения рассматриваемого региона дополненное динамикой отраслей

животноводства. Фазовые переменные модели – площади земель соответствующих категорий и поголовье сельскохозяйственных животных.

Из отраслей животноводства выделяется молочное скотоводство, для которого в явном виде описываются воспроизводственные процессы, а также ежегодная структура рациона кормления и зависимость от него молочной продуктивности. Таким образом, управляющими переменными молочного стада являются коэффициент воспроизводства и структура рациона кормления животных; коэффициент выбраковки при этом по годам считается неизменным. При этом поголовье и продуктивности прочих отраслей животноводства в качестве динамических переменных не рассматриваются и предполагаются переменными экзогенными. Тот факт, что каждой фазовой переменной можно сопоставить удельные значения валового дохода и углеродного следа, дает возможность поставить задачу одного из рассмотренных выше типов. Основные соотношения модели представлены далее.

$$F(prf(\tau), ge(\tau)) \rightarrow \underset{\beta_i(\tau), \theta(\tau), \delta_j(\tau)}{extr}, i \in I, \tau \in [0, T], \beta_i^{min} \leq \quad (10)$$

$$\beta_i(\tau) \leq \beta_i^{max}, \forall \tau \in [1, T],$$

$$A_i(\tau + 1) = A_i(\tau) \times (1 + \beta_i(\tau)), A_i(1) = A_i^0 \quad (11)$$

$$N_1(\tau + 1) = N_1(\tau) \times (1 - \varepsilon(\tau)) + 0,5 \times N_1(\tau - 2) \times \theta(\tau), \quad (12)$$

$$N_1(-2) = N12, N_1(-1) = N11,$$

$$N_m(\tau + 1) = N_m(\tau) \times (1 + gr_m(\tau)), N_m(0) = N_m^0, m \in \quad (13)$$

$$[2,3,4] \tau \in [0, T],$$

$$\sum_{i \in I} A_i(\tau) = AT(\tau), \forall \tau \in [1, T], \quad (14)$$

где $F(prf(\tau), ge(\tau))$ – критерий оптимальности процессов низкоуглеродной трансформации агропродовольственной системы, зависящий от валового дохода, ЭПГ и конкретной постановки оптимизационной задачи,

$\beta_i(\tau)$ – искомые темпы изменения структуры землепользования,

$\theta(\tau)$ – коэффициент воспроизводства молочного стада, в долях от потенциально возможного ремонтного поголовья с учетом выхода годного молодняка, 1/год,

$\delta_j(\tau)$ – параметры структуры кормового рациона коров молочного стада (содержание j – го кормового средства в долях от общей массы сухого вещества рациона), доли,

$I = \{\text{пашня, многолетники, залежь, пастбища и сенокосы, лес}\}$ – множество категорий земель,

$M = \{\text{коровы, свиньи, овцы, птица}\}$ – множество отраслей животноводства, $m \in M$,

T – период времени, на котором моделируется процесс низкоуглеродной трансформации АПС, лет,

$A_i(\tau)$ – площадь земель i – й категории на землях сельскохозяйственного назначения,

A_i^0 – размер площадей соответствующих земельных угодий в начальный момент времени,

$AT(\tau)$ – общая площадь земельных угодий (в частном случае $AT(\tau) = const$),

$N_1(\tau)$ – поголовье молочных коров в году τ ,

$NK11, NK12$ – поголовье коров за два предыдущих года,

$\varepsilon(\tau)$ – коэффициент выбраковки, 1/год,

$N_m(\tau)$ – поголовье свиней, овец и коз, взрослых кур при $m=[2,3,4]$, соответственно,

$gr_m(\tau)$ – сценарно задаваемые темпы прироста соответствующего поголовья.

Валовой доход определяется по формуле:

$$\begin{aligned} prf(\tau) = & \sum_{i \in I} sp_i(\tau) \times A_i(\tau) + \sum_{m=1,4} spa_m(\tau) \times N_m(\tau) - 0,1 \\ & \times \sum_{j=1,2} p_j(\tau) \times A_{1j}(\tau) \times y_j(\tau) - sp_4(\tau) \\ & \times A_{21}(\tau), \end{aligned} \quad (15)$$

где $prf(\tau)$ – валовой доход, тыс. руб./год,

$sp_i(\tau)$ – удельный валовой доход с единицы площади i -го вида,

$sp_4(\tau)$ – тоже с единицы площади пастбищ и сенокосов,

$spa_m(\tau)$ – тоже с одной головы m – го вида животных,

$A_{21}(\tau)$ – потребная для производства зеленых и грубых кормов площадь пастбищ и сенокосов,

$A_{1j}(\tau), j = 1,2$ – площади зерновых культур и корнеплодов, используемых в рационах кормления животных,

$y_j(\tau)$ – урожайности зерновых и корнеплодов, соответственно,

$p_j(\tau)$ – цена реализации зерновых и корнеплодов производителем.

Для определения удельной валовой продукции молочного стада необходимо оценить величину годового надоя молока. Как известно, молочная продуктивность при нормативном потреблении массы сухого вещества корма зависит от концентрации обменной энергии в рационе кормления коров:

$$\rho = \sum_{j \in J} \delta_j \times v_j, \quad (16)$$

где v_j – содержание обменной энергии в j -м кормовом средстве, Мдж/кг с.в.

$J \ni j$ – множество кормовых средств.

Годовой надой от одной лактирующей коровы равен [18]:

$$my(\rho) = \frac{0,001425 \times \rho^2 \times MK - 0,456 \times \rho - 0,005187 \times \rho \times MK}{(3 - 0,0057 \times \rho^2)} \times TL, \quad (17)$$

где TL – продолжительность периода лактации, сут,

MK – масса коровы, кг.

Обработка региональных данных дает возможность установить статистическую связь между удельным доходом и надоями молока:

$$\ln(spa_1) = 0,74 \times \ln(my(\rho)) - 1,43, \quad R^2 = 0,76, \quad (18)$$

Калибровка этой зависимости для конкретного региона выполняется подгонкой свободного члена в (18).

Приступим к описанию процессов ЭПГ, от сельского хозяйства АПС регионов.

В качестве методической основы используем способ оценки ЭПГ, изложенный в [19]. Он предусматривает оценку выбросов парниковых газов из различных источников, с разными степенями детализации описания процессов их производства, накопления в тех или иных компартментах, а также выбросов в атмосферу. Распределение ЭПГ по источникам их возникновения приведено в нижеследующей таблице 1.

Таблица 1 – Распределение ЭПГ по источникам их образования, принятое в модели

Источники ЭПГ	Виды парниковых газов		
	Углекислый газ	Метан	Закись азота
Пашня	+	-	+
Многолетники	+	-	+
Пастбища и сенокосы	+	-	+
Залежь	+	-	+
Лесные массивы	+	-	-
Крупный рогатый скот	-	+	+
Свины	-	+	+
Овцы и козы	-	+	+
Птица	-	+	+

Источник: составлена авторами по материалам [19].

Таким образом, ЭПГ в CO_2 -эквиваленте определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
 ge(\tau) = \sum_{i \in I1} (e_i + 298 \times e_{in2o}) \times A_i(\tau) + e_f \times A_f(\tau) + N_1 \times (21 \\
 \times e_{ch4}^1 + 298 \times e_{n2o}^1) \\
 + \sum_{m \in M} N_m(\tau) \times (21 \times e_{ch4}^m + 298 \times e_{n2o}^m),
 \end{aligned} \tag{19}$$

где $ge(\tau)$ – ЭПГ в CO_2 эквиваленте, т/год,

$I1$ – множество категорий земельных угодий без учета лесных массивов,

e_i –удельная эмиссия CO_2 i –й категории земель, т/га/год,

e_f – то же лесного массива, т/га/год,

e_{in2o} – удельная эмиссия закиси азота i –й категории земель, т/га/год,

$A_f(\tau)$ – площадь лесного массива,

e_{ch4}^1 – удельная эмиссия метана одной коровы, т/год,

e_{n2o}^1 – то же закиси азота, т/год,

e_{ch4}^m – удельная эмиссия метана для m –го вида сельскохозяйственных животных, т/год

$e_{n_2o}^m$ – то же закиси азота, т/год

В соответствии с [18] связь между энтеральными выбросами молочных коров и годовыми надоями можно приближенно описать следующим регрессионным уравнением:

$$e_{ch_4}^1 = 27,8 \times \ln(\text{my}(\rho)) - 132,7, \quad (20)$$

Согласно [18], удельная эмиссия e_i зависит от продолжительности вегетационного периода, типа почв, особенностей растительного покрова (пашня/многолетники). Значение удельной эмиссии на пашне нужно уменьшить на величину секвестрации углерода за счет оптимизации отраслевой структуры растениеводства, деленной на площадь (см.6).

Удельное депонирование углерода в годовом приросте лесных массивов, в соответствии с [20], для зоны смешанных лесов меняется в пределах 1,32–2,61 т. С/га. В этой же работе обосновывается способ оценки показателя с использованием данных Государственного лесного реестра.

Моделирование процессов лесоводства и, тем более, естественного зарастания залежей, представляет собой очень сложную и многогранную научную проблему [21], поэтому в данной версии модели низко углеродной трансформации АПС, мы ограничимся только случаем создания искусственных насаждений с темпами, определяемыми искомыми управлениями $\beta_i(\tau)$ (см. 10-14). В качестве модельной породы деревьев будем предполагать березу, которая, во многих случаях является деревом-пионером. Исходные данные для оценки чистой первичной продуктивности лесного массива

заимствованы из [22], (с. 660. Табл. 8.1.2. Динамика биологической продуктивности целевых программ лесовыращивания березовых насаждений в Европейской части, II-й бонитет). Для регионов субаридной и частично аридной зоны [23] в качестве модельной породы древесной растительности приняты сосновые посадки IV-го бонитета.

С учетом сказанного удельный показатель e_f можно записать в виде:

$$e_f = e_f(\theta) = k_r \times NPP(\theta) \times \frac{44}{12}, \quad (21)$$

где $NPP(\theta)$ —чистая первичная продуктивность модельного насаждения в возрасте θ лет, т С× га⁻¹ × год⁻¹,

k_r —безразмерный коэффициент, учитывающий уменьшение $NPP(\theta)$ за счет гетеротрофного дыхания лесного массива, принято $k_r \approx 0,5$

Зависимость чистой первичной продуктивности березовых насаждений, возраста θ лет, полученная при аппроксимации данных [22], имеет вид:

$$NPP(\theta) = 0,00005 \times \theta^3 - 0,0057 \times \theta^2 + 0,28 \times \theta + 0,92, R^2 = 0,99, \quad (22)$$

Таким образом, аккумулярование CO_2 лесным массивом переменной площади $A_f(\tau)$ можно получить перемножением этой площади на текущее значение приведенного удельного показателя $e_f(\sigma, \tau)$:

$$e_f(\sigma, \tau) = \frac{e_f(\theta_0 + \tau) \times A_{f0}}{A_f(\tau)} \times \sum_{\sigma=1}^{\tau} \beta_f(\sigma) \times A_f(\sigma) \times e_f(\tau - \sigma + 1), \quad (23)$$

где A_{f0} – площадь, покрытая лесом в начальный момент времени,
 $e_f(\theta_0 + \tau)$ – удельное аккумулярование CO_2 лесным массивом возраста θ_0 к моменту времени τ , существующим на начало моделирования,
 $\beta_f(\sigma)$ – искомые темпы лесных посадок,
 $A_f(\sigma)$ – текущая площадь лесных насаждений.

Нужно отметить, что в данном способе моделирования динамики лесного массива на сельских территориях не учтено влияние некоторых факторов жизни леса, таких как пожары, болезни, коммерческие рубки. Способы оценки остальных удельных показателей из (19) заимствованы из [18] и повторять их описание в данной работе не целесообразно.

Выводы

Кроме рассмотренной выше, записанной с помощью зависимостей (10)-(14) типовой модели АПС региона, варианты постановок задачи и направления исследований могут быть следующими:

- 1) оценка потенциала максимальной декарбонизации – представляет собой тривиальное решение, предполагающее отказ от ведения сельскохозяйственного производства;
- 2) стратегия максимальной декарбонизации АПС региона при условии выполнения ограничений на минимальный валовой доход;
- 3) стратегия максимизации валового дохода при ограничении ЭПГ;

4) стратегия максимизации текущих значений окупаемости валовым доходом ЭПГ;

5) стратегия, реализующая возможности экспертного выбора сочетания {валовой доход; ЭПГ} на Парето-оптимальном множестве на основании выполнения условий самообеспечения населения продовольствием.

Для данной модели экзогенной является следующая информация: урожайности сельскохозяйственных культур, поголовье и продуктивности свиней, овец и коз, птицы, а также цены реализации агропродовольственной продукции. Любые допустимые сочетания этих величин можно отнести к пространству сценариев. При этом предполагается, что с точки зрения социальной эффективности и устойчивости полученных структурных параметров региональных АПС, необходимо провести оценку физической и экономической доступности продовольствия как для населения отдельного региона, так и для страны в целом. В связи с этим предполагается, что любой постановке задачи и соответствующему решению можно сопоставить производство агропродовольственной продукции в расчете на одного жителя региона и использовать этот показатель для характеристики самообеспечения населения региона и продовольственной безопасности страны в целом. Практическая реализация экономико-математической модели в форме информационно-аналитической системы и ее использование для оценок низко углеродных стратегий развития региональных АПС приводится в следующем разделе

2 Описание структуры и функций информационно-аналитической системы низко углеродной трансформации АПС региона, апробация системы на региональной информации

2.1 Структура и функции информационно-аналитической системы, интерфейс системы

Низко углеродная трансформация АПС регионов может реализовываться в рамках различных стратегий: от самых жестких, предусматривающих минимизацию ЭПГ при нулевых, или даже отрицательных темпах экономического роста, до «мягких» ее вариантов, сочетающих некоторый экономический рост с уменьшением ЭПГ с земель сельскохозяйственного назначения. Разработка стратегий декарбонизации АПС осложняется большим разнообразием комплекса региональных условий, ведущая роль в котором принадлежит почвенно-климатическим факторам, которые в значительной степени определяют особенности функционирования, а также структуру отраслей растениеводства и животноводства. Для поддержки стратегического планирования низко углеродной трансформации региональных АПС применен инструментарий в виде информационно-аналитической системы ДЕКАРБОН_СХ, функционал которой предусматривает выдачу среднесрочных прогнозов развития региональных АПС с учетом климатических изменений по двум сценариям: RCP8.5 и RCP4.5 [24].

В соответствии с первым сценарием реализуется принцип «business as usual», что означает отсутствие механизмов адаптации к изменениям климата в регионах; во втором сценарии такие механизмы

предусматриваются и реализуются путем оптимизации землепользования, корректировки отраслевой структуры, урожайностей и продуктивностей при производстве растениеводческой и животноводческой продукции.

Информационно-аналитическая система ДЕКАРБОН_СХ обеспечивает широкие возможности для имитации разнообразных стратегических решений на уровне регионов с комплексной оценкой полученных результатов (скрины экранов представлены в ПРИЛОЖЕНИИ А).

В настоящей версии системы задействованы 79 регионов Российской Федерации; новые регионы могут быть добавлены после формирования у них соответствующей статистической информации. Нужно отметить, что при этом реализуется единый подход к трансформации АПС регионов, сводящийся только к рассмотрению названных выше сценариев.

Таким образом, все рассматриваемые социально-экономические характеристики образуют замкнутое множество, ограниченное, с одной стороны, требованиями жесткой стратегии минимизации углеродного следа от сельского хозяйства землепользования в целом, а с другой, желанием экономических субъектов вести «бизнес как обычно».

Пространство стратегий образовано сочетанием следующих признаков:

- параметрами экономического окружения АПС регионов;
- вариантами демографического прогноза;
- методами получения прогнозных характеристик развития региональных АПС: экстраполяция тенденций или решение оптимизационных задач;

–вариантом постановки задач для экономико-математических моделей оптимизации структуры посевных площадей в растениеводстве, отраслевой структуры животноводства, структуры землепользования на землях сельскохозяйственного назначения;

–задаваемыми экспертно ограничениями в оптимизационных задачах.

Контекст использования экономических категорий «эффективность» и «устойчивость», примененный к трансформируемому АПС, в данном случае требует пояснений.

В максимально агрегированном виде АПС региона продуцирует валовой доход и углеродный след. Таким образом, можно характеризовать эколого-экономическое состояние АПС для двух стратегий, соответствующих сценариям RCP8.5 и RCP4.5, соответственно. Принимая в качестве базовой стратегию сценария RCP8.5, изменения валового дохода и углеродного следа в варианте низко углеродной трансформации могут служить мерой эффективности стратегий в рамках сценария RCP4.5. Мерой социальной эффективности этой же стратегии логично в данном случае считать изменения, которые могут иметь место в само обеспечении населения регионов продовольствием основных видов.

В процессе низко углеродной трансформации множества региональных АПС очевидно будет меняться их положение в рейтинговом списке, образованном процедурой упорядочения по показателям эколого-экономической и социальной эффективности. Таким образом, в качестве меры трансформационной устойчивости естественно принять приросты мест в рейтинговом списке.

Информационно-аналитическая система ДЕКАРБОН_СХ является средством программной поддержки, которое может быть

полезным при стратегическом планировании низко углеродной трансформации АПС в регионах России. Функционал ИАС реализует краткосрочный прогноз динамики АПС регионов при 2 климатических сценариях и сопоставление с фактическим состоянием АПС.

Климатические сценарии RCP8.5 и RCP4.5 предполагают отсутствие адаптационных мероприятий и достаточно жесткое реагирование на климатическую динамику, соответственно. Первая стратегия предполагает инерционное поведение производителей и моделируется экстраполяцией экстенсивных (площади, поголовье) и интенсивных (урожайности, продуктивности) переменных. Вторая стратегия представляет собой результат решения ряда задач с использованием экономико-математических моделей с комплексными критериями, комбинирующими эколого-экономические и социально-экономические характеристики низко углеродной трансформации АПС регионов.

Агрегирование частных критериев производится путем их свертки с весовыми коэффициентами, которые определяют значимость достижения результата по каждому из них. Таким образом, для каждого региона можно регулировать нагрузку по снижению углеродного следа АПС, сохранению или росту доходности производства сельскохозяйственной продукции, обеспеченности населения продовольствием. Как для первой, так и для второй стратегии выполняются оценки продовольственной безопасности на уровне Российской Федерации по основным видам продовольствия, определяются рейтинги регионов по показателям само обеспечения и соответствия медицинским нормам потребления. На рисунке 2 показана структурная схема информационно-аналитической системы ДЕКАРБОН_СХ.

Кратко опишем функции каждого блока этой системы. Блок ДЕМОГРАФ реализует три варианта (сценария) динамики численности населения в регионах Российской Федерации. Основу составляют данные, предоставляемые Министерством экономики, экстраполируемые при необходимости с использованием аппроксимаций региональных временных рядов. Параметры аппроксимаций могут корректироваться в случае поступления новой информации при продолжении демографических рядов. Данные блока используются для получения оценок степени обеспеченности населения продовольствием.



Источник: составлен авторами

Рисунок 2 – Структурная схема, отражающая информационное взаимодействие функциональных блоков системы

Блок ИНФОРМАЦИЯ_ОПТ содержит основные данные о фактическом состоянии отраслей растениеводства в разрезе следующих показателей: урожайностей сельскохозяйственных культур и их посевных площадей, содержания N, P, K в почве, дозах внесения минеральных удобрений и ценах их приобретения, ценах реализации растениеводческой продукции. Основным потребителем этой

информации является блок ОПТИМ_ОТРАСЛЕЙ, функционал которого состоит в решении задачи оптимизации отраслевой структуры для полевых культур. Критерий оптимальности представлен взвешенной суммой валового дохода и прироста запасов гумуса по отношению к исходному состоянию системы. Решением задачи являются посевные площади следующих сельскохозяйственных культур: пшеница озимая и яровая, рожь озимая и яровая, тритикале озимая и яровая, кукуруза на зерно, ячмень озимый и яровой, гречиха, просо, овес, рис, сорго, горох, чечевица, бобы кормовые, фасоль, вика и виковые, а также люпин на зерно, прочие зернобобовые, подсолнечник на зерно, соя, рапс озимый и яровой, лен-кудряш, лен-долгунец, свекла сахарная, картофель, овощи открытого грунта, корнеплодные кормовые культуры, свекла кормовая, кукуруза на корм, культуры кормовые на силос (без кукурузы), однолетние травы, многолетние травы посева прошлых лет. Урожайности перечисленных культур даны в виде производственных функций доступных элементов минерального питания, фонд которых состоит из почвенных запасов легко гидролизуемого азота, подвижного фосфора и обменного калия, вносимых минеральных и органических удобрений с учетом соответствующих коэффициентов использования. Таким образом, второй частью в решении задачи оптимизации отраслевой структуры растениеводства, является дозы минеральных удобрений. Задача решается в предположении неизменности суммы посевных площадей и общего объема вносимых минеральных удобрений, который, тем не менее, может быть изменен опционально. Также имеется возможность редукции двухкритериальной задачи оптимизации к однокритериальной: максимизировать секвестрацию углерода гумуса при сохранении валового дохода на достигнутом уровне или

максимизировать валовой доход, не обращая внимания на углеродный след, генерируемый пашней, а также задавая его целевые величины в форме ограничений.

Для оценки секвестрации углерода на пашне используется блок БАЛАНС ГУМУСА, с помощью которого запасы гумуса пересчитываются на каждом шаге алгоритма оптимизации отраслевой структуры растениеводства в блоке ОПТИМ_ОТРАСЛЕЙ; на рисунке 2 это обстоятельство отражено встречными стрелками. Используется простая модель баланса гумуса: «гумификация корне-поживных остатков минус минерализация по выносу с урожаями сельскохозяйственных культур». Массы корне-поживных остатков с урожайностями сельскохозяйственных культур связаны регрессионными соотношениями. В данном блоке имеется локальная база данных, содержащая сведения о преобладающих типах почв в регионах и соответствующих им значениях коэффициентов гумификации «свежей» органики и минерализации гумуса, а также дозах органических удобрений, вносимых на севооборотную площадь возделываемых сельскохозяйственных культур. Вторая составляющая углеродного следа пашни – эмиссия закиси азота – оценивается на основе уравнения регресс, связывающим ее годовой объем с дозами азота минеральных и органических удобрений.

Блок КЛИМАТ_УРОЖАЙ предназначен для учета влияния гидротермических характеристик прогнозного периода на урожайности перечисленных культурных растений. В качестве аргумента в зависимостях урожайностей сельскохозяйственных культур используется гидротермический коэффициент Селянинова, вычисленный для теплого периода (среднесуточная температура воздуха больше 10 град. С) соответствующих регионов. Блок содержит

локальную базу данных с долгосрочными прогнозами среднемесячных значений температуры воздуха и месячных сумм осадков, соответствующих двум сценариям: RCP8.5 и RCP4.5, соответственно. Для аппроксимации зависимости урожайностей от ГТК применяется аналитическая функция «куполообразного» вида с кардинальными точками, соответствующими минимальному ($\sim 0,2-0,3$) и максимальному (~ 3) значениям ГТК, в которых урожайности близки к нулю. Точка, соответствующая ГТК, обеспечивающему максимальную урожайность, изменяется в некоторых пределах в соответствии с влаголюбивостью или, напротив, с засухоустойчивостью той или иной культуры. Таким образом, производственные функции урожайностей из блока ОПТИМ_ОТРАСЛЕЙ для сценария RCP4.5 модифицируются путем умножения фактических значений, содержащихся в блоке ИНФОРМАЦИЯ_ОПТ на индексы изменения урожайностей вследствие климатических изменений на прогнозном интервале. Аналогичный подход реализован для сценария RCP8.5.

Блок ЭПГ_ЖИВОТНЫЕ предназначен для краткосрочного прогнозирования поголовья и продуктивностей сельскохозяйственных животных для сценария RCP8.5 – «business as usual», а также для оценки ЭПГ: метана энтерального происхождения, метана экскрементов, закиси азота из экскрементов животных. Их взвешенная сумма (с учетом потенциалов глобального потепления для метана, равного 21, для закиси азота 298) дает оценку углеродного следа отраслей животноводства для региональных АПС. Принятый способ среднесрочного прогнозирования нами описан в источнике [25] и повторяет первый методический подход, рекомендуемый МГЭИК. Используемая в этом модуле нормативная информация об ЭПГ животных приведена в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

Функционал блока МОДУЛЬ ДЕКАРБОН_СХ ориентирован на решение двух оптимизационных задач:

1) нахождения рациональной отраслевой структуры животноводства каждого региона, рассматриваемой в качестве стратегической цели, которую нужно достичь к концу прогнозного периода;

2) нахождения рациональной структуры землепользования на землях сельскохозяйственного назначения.

Решение первой задачи состоит в оптимизации взвешенной суммы двух критериев: углеродного следа и прироста валового дохода животноводства.

Решение второй задачи заключается в определении площадей земель рассматриваемых категорий (пашня, пастбища и сенокосы, многолетние насаждения, залежи, лесные массивы) на конце прогнозного интервала времени, которые минимизируют ЭПГ АПС при, как минимум, не ухудшении объемов производства валовой продукции с перечисленных категорий земель. При этом удельное значение валового производства продукции растениеводства на пахотных землях, а также снижение ЭПГ за счет секвестрации углерода гумуса считается известными в силу решений, полученных в блоке ОПТИМ_ОТРАСЛЕЙ.

Ограничениями данной задачи являются не превышение заданных темпов изменения земель разных категорий, а также требование сохранения общей площади земель сельскохозяйственного назначения.

В блоке РЕЗУЛЬТАТЫ аккумулируется вся информация, полученная в результате продуктивного решения перечисленных задач, выполняются оценки производных показателей, имеющих

аналитическое значение. Вся выходная информация сосредоточена в следующих таблицах:

1. Землепользование;
 - 1.1 Площади земель сельскохозяйственного назначения по категориям;
 - 1.2 Структура землепользования;
2. Производственные показатели растениеводства;
 - 2.1 Посевные площади сельскохозяйственных культур;
 - 2.2 Структура посевных площадей;
 - 2.3 Валовой производство продукции растениеводства;
3. Производственные показатели животноводства;
 - 3.1 поголовье сельскохозяйственных животных в хозяйствах всех категорий;
 - 3.2 Производство продукции животноводства;
4. Эффективность и устойчивость АПС региона;
5. Углеродный след продукции животноводства по видам;
6. Углеродный след АПС по источникам его эмиссии;
7. Самообеспеченность населения регионов продовольствием;
8. Степень достижения медицинских норм здорового и полноценного питания.

Все показатели представлены фактическими и прогнозными значениями, соответствующими двум климатическим сценариям. Интерфейс системы поддерживает расчетный и аналитический режимы работы. В расчетном режиме имеется возможность получить набор показателей для одного, нескольких или всех регионов Российской Федерации.

Аналитические функции представлены в ПРИЛОЖЕНИИ А; там же помещено свидетельство о регистрации программы. На

интервале прогнозирования (10 лет), по желанию Пользователя, могут меняться некоторые параметры, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры системы низко углеродной трансформации АПС регионов

ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИКИ АПС	Минимум	Максимум	Выбрано
Предельные темпы трансформации, доли/10 лет			
Пашня	0,1	0,5	0,3
Пастбища и сенокосы	0,1	0,5	0,3
Многолетники	0,1	0,5	0,3
Залежи	0,1	0,5	0,3
Лесные массивы	0,1	0,5	0,4
Темпы роста потенциальной урожайности и продуктивности, доли/10 лет			
Зерновые культуры	0	0,3	0
Технические культуры	0	0,3	0
Темпы роста объемов внесения минеральных удобрений, доли/10 лет			
Объем NPK в действующем веществе	0	0,3	0,3
Эколого-экономические предпочтения стратегии декарбонизации			
Значимость (потребность) в накоплении углерода на пашне	0	500	0
Значимость (потребность) в росте доходов животноводства	0	1	0,8
Снижение удельных выбросов выбросов за счет инновационных технологий, %			
Крупный рогатый скот	0	80	35
Овцы	0	55	25
Свиньи	0	27	15
Обращение с экскрементами	0	40	25

Источник: параметры информационно-аналитической системы ДЕКАРБОН_СХ [28].

2.2 Апробация системы на региональной информации

Развитие региональных АПС зависит от большого числа факторов самой разнообразной природы: географических, почвенно-климатических, демографических, организационно-хозяйственных, социально-экономических и пр. Описать их эволюцию на стратегически значимых интервалах времени можно только в рамках тех или иных

сценариев, задавая их вероятную динамику в соответствии с представлениями разработчиков и актуальными нормативными документами стратегического характера. В данном контексте речь идет о «Стратегии низко углеродного развития России до 2050 г.», утвержденной Правительством РФ распоряжением от 29 октября 2021 г. № 3052-р.

МГЭИК сформулировала два основных сценария, отражающих влияние экономической деятельности на климатические изменения. Один из них – RCP8.5 («репрезентативные траектории концентрации парниковых газов») – предполагает сохранение существующих тенденций использования ископаемого топлива при отсутствии механизмов снижения выбросов парниковых газов в отраслях экономики. Второй – RCP4.5 – предусматривает меры отраслевой адаптации с учетом требований по снижению углеродного следа от их функционирования.

Информационно-аналитическая система ДЕКАРБОН_СХ, опирается на модель АПС регионов и обеспечивает широкие возможности для имитации разнообразных стратегических решений с комплексной оценкой полученных результатов. Особенностью системы является поиск и обоснование эффективных стратегий развития и размещения сельского хозяйства с учетом эколого-экономических и социально-экономических критериев, предполагающих снижение углеродного следа АПС и не снижающих уровни доходностей в отраслях сельского хозяйства.

В максимально агрегированном виде и в модельном представлении региональная АПС продуцирует валовой доход и углеродный след. Это позволяет оценивать эколого-экономическое состояние АПС для двух стратегий, соответствующих сценариям

RCP8.5и RCP4.5. Если в качестве базовых принять фактические состояния региональных АПС или их состояния при реализации стратегии RCP8.5, то изменения валового дохода и углеродного следа в варианте низко углеродной трансформации в рамках сценария RCP4.5, могут служить мерой эффективности этих процессов. Мерой социальной эффективности таких стратегий логично в данном случае считать изменения, которые могут иметь место в самообеспечении населения регионов продовольствием основных видов.

Все рассматриваемые характеристики АПС регионов образуют замкнутое множество, ограниченное, с одной стороны, требованиями жесткой стратегии минимизации углеродного следа от сельского хозяйства и землепользования на землях сельскохозяйственного назначения, а с другой, желанием экономических субъектов вести «бизнес как обычно». Пространство стратегий образовано сочетанием следующих признаков:

- параметрами экономического окружения АПС регионов;
- вариантами демографического прогноза;
- темпами изменений параметров технологических способов производства продукции сельского хозяйства из-за НТП;
- методами получения прогнозных характеристик развития региональных АПС: экстраполяция тенденций (сценарий RCP8.5) или решение оптимизационных задач (сценарий RCP4.5);
- вариантом постановки задач для экономико-математических моделей оптимизации структуры посевных площадей в растениеводстве, отраслевой структуры животноводства, структуры землепользования на землях сельскохозяйственного назначения;
- задаваемыми экспертно ограничениями в оптимизационных задачах.

Система ДЕКАРБОН_СХ последовательно для каждого региона из заданного списка решает три оптимизационные задачи:

1) оптимизация структуры посевных площадей сельскохозяйственных культур, доз минеральных удобрений и связанных с ними урожайностей; кроме этого оценивается объем секвестрации углерода в органическом веществе почвенного слоя;

2) двухкритериальная оптимизация производственной структуры животноводства по валовому доходу и углеродному следу продукции;

3) оптимизация структуры землепользования на землях сельскохозяйственного назначения по критериям производства валовой продукции и выбросам парниковых газов. Нужно отметить, что в зависимости от значимости экономической и экологической составляющих критериев оптимизации, определяемой весовыми коэффициентами, может быть получено множество стратегий декарбонизации региональных АПС. Как всегда, выбор конкретной стратегии зависит от лица, принимающего решение.

Приведем некоторые характеристики двух полярных стратегий низко углеродной трансформации АПС регионов. Целями первой (назовем этот вариант «экономическим») является преимущественно дальнейшее экономическое развитие, а значимость экологической компоненты критерия мала. Целью второй, «жесткой» стратегии (вариант «экологический»), является минимизация выбросов парниковых газов без учета возможных негативных явлений социально-экономического характера. За точку отсчета примем фактическое состояние региональных АПС в 2023 г. и оценим структурные сдвиги в отраслях растениеводства, животноводства, землепользовании, а также в самообеспечении населения регионов продовольствием к 2035 году.

Кроме этого представим сопутствующие изменения в объемах ЭПГ. Для описания перечисленных изменений был использован 51 показатель: 5 – для категорий земель сельскохозяйственного назначения, 10 – для описания изменений структуры посевных площадей основных полевых культур, 5 – для численности стад сельскохозяйственных животных, 7 – для сдвигов в объемах производства животноводческой продукции, 9 – для самообеспеченности продовольствием, 2 – для индексов производства валовой продукции растениеводства и животноводства и 13 – для описания изменений ЭПГ из разных источников их происхождения.

Анализ полученных результатов может быть выполнен разными способами и зависит от поставленных задач. Например, качественная картина структурных сдвигов по перечисленным направлениям и доля регионов России с такими признаками показана в следующей таблице 3. Отметим, что 100%-й прирост означает, что все регионы продолжают наращивать этот показатель.

Как следует из полученных оценок, в «экономическом» варианте можно видеть рост посевных площадей и большинства показателей за исключением поголовья скота, что является следствием прогнозируемого роста надоев молока. Обращает на себя внимание существенный прирост посевных площадей, что соответствует целевым установкам действующей с 2022 г. «Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации». В этом документе предусматривается ввести 13,235 млн га к 2031 году. Нарастают посевные площади под картофелем и овощами, соей, рапсом и кукурузой. Уменьшаются посевы подсолнечника и многолетних трав.

Таблица 3 – Производственные показатели низко углеродной трансформации АПС России

Производственные показатели низко углеродной трансформации АПС России	Приросты "вариант-факт"		Доля регионов с положительными приростами показателей, %	
	«Эко-номи-ческий»	«Эко-логи-ческий»	«Эко-номи-ческий»	«Эко-логи-ческий»
Прирост посевных площадей, тыс. га	6560,2	-1640,4	98,7	2,5
Прирост посевных зерновых и зернобобовых	7,4	5699,4	69,6	72,2
Прирост посевов сои	782,9	782,9	68,4	68,4
Прирост посевов рапса	1080,2	238,6	62,0	45,6
Прирост посевов кукурузы	1193,9	-761,8	78,5	43,0
Прирост посевов подсолнечника	2261,6	-4136,0	64,6	31,6
Прирост посевов сахарной свеклы	217,6	-375,8	88,6	70,9
Прирост посевов картофеля	755,6	755,6	64,6	64,6
Прирост посевов овощей	158,0	-31,5	81,0	70,9
Прирост многолетних трав	-2160,7	1373,7	25,3	64,6
Прирост поголовья КРС, тыс. гол	-956,2	-8839,8	59,5	1,3
Прирост поголовья коров, тыс. гол	-310,4	-3680,7	65,8	1,3
Прирост поголовья свиней, тыс. гол	5022,2	-3805,5	97,5	35,4
Прирост поголовья овец, тыс. гол	7571,8	-12094,9	96,2	0,0
Прирост производства мяса всего, тыс. т	2690,9	203,7	100,0	45,6
Прирост производства говядины, тыс. т	83,0	-675,5	100,0	3,8
Прирост производства свинины, тыс. т	943,9	-396,5	100,0	38,0
Прирост производства баранины, тыс. т	62,1	-99,9	100,0	3,8
Прирост производства мяса птицы, тыс. т	1601,8	1375,6	100,0	98,7
Прирост производство молока, тыс. т	9791,1	-8807,1	100,0	3,8
Прирост производство яиц, тыс. шт.	57787,2	42796,3	94,9	93,7

Источник: расчеты авторов

Тенденция последних в совокупности со снижением площадей пастбищ и сенокосов коррелирует с сокращением поголовья жвачных – значимых эмитентов парниковых газов в региональных АПС. Такое изменение отраслевой структуры животноводства не уменьшило обеспеченность населения животноводческой продукцией. Так,

обеспеченность мясом всех видов собственного производства выросла на 12,89 кг/чел/год, молоком – на 40 кг/чел/год.

Напротив, в «экологическом» варианте можно видеть во многом обратную тенденцию: снижаются площади посевов, происходит то, что и должно происходить при росте углеродной нагрузки на отрасли растениеводства: уменьшается площадь под посевами подсолнечника, кукурузы, сахарной свеклы, растут площади многолетних трав. В животноводстве меняется отраслевая структура, сопровождающаяся недопустимо большим снижением поголовья в большинстве регионов, что приводит к перекосу в сторону производства мяса птицы. Снижаются производственные возможности молочного скотоводства в удовлетворении спроса на молоко и молочные продукты. В нижеследующей таблице 4 приведены оценки структурных сдвигов социальных показателей по самообеспеченности населения регионов продовольствием основных видов.

Таблица 4 – Социальные показатели низко углеродной трансформации АПС России

Социальные показатели низко углеродной трансформации АПС России: самообеспеченность продовольствием, кг/чел/год	Приросты "вариант-факт"		Доля регионов с положительными приростами показателей, %	
	«Экономический»	«Экологический»	«Экономический»	«Экологический»
Изменения самообеспеченности:				
мясом	17,1	-5,6	100,0	45,6
говядиной	0,5	-4,2	100,0	3,8
свининой	6,7	-7,4	100,0	38,0
бараниной	0,6	-0,9	100,0	3,8
мясом птицы	9,4	6,8	100,0	98,7
молоком	51,2	-58,4	100,0	3,8
картофелем	1,3	-21,1	57,0	20,3
овощами	32,9	12,8	78,5	68,4
яйцом, шт./чел/год	301,2	290,6	94,9	93,7

Источник: составлена на основе расчетов авторов

Полученные оценки показывают, что в «жестком» варианте низко углеродной стратегии региональных АПС существенно падает самообеспеченность мясом – более чем в половине регионов, молоком – более чем в 96% регионов, картофелем почти в 80% регионов. Из-за смещения структуры животноводства в сторону роста производства мяса птицы, самообеспеченность по этой позиции ухудшается незначительно, только для 1,3% регионов.

В случае с «жесткой» низко углеродной стратегии возникают ситуации сочетанного дефицита самообеспеченности продовольствием. Все комбинации сочетанного снижения самообеспеченности продовольствием, представлены в таблице 5. Таких групп регионов, в которых фиксируется снижение самообеспеченности по не повторяющимся сочетаниям видов продовольствия, оказалось 20. Как уже говорилось, представленные стратегические решения, соответствующие целям экономического развития АПС регионов, приводят к снижению углеродного следа для уровня Российской Федерации менее чем на 2% по сравнению с фактом. Отметим, что стратегия минимизации углеродного следа при сохранении отраслевых доходностей, увеличивает этот показатель до 7%, а снятие ограничения на сохранение доходностей – до 11,7%. Экологический эффект обсуждаемых «крайних» стратегий декарбонизации отражен в следующей таблице. Как следует из таблицы 6 «жесткая» стратегия декарбонизации находит отражение в подавляющем большинстве регионов. Основная нагрузка приходится на посевные площади, животноводство и в меньшей степени распространяется на изменения в землепользовании.

Таблица 5 – Группы АПС, в которых происходит снижение самообеспеченности одинаковыми видами продовольствия

№	Группа региональных АПС	Самообеспеченность снижается по продуктам:
1	Республика Алтай	Баранина
2	Республика Башкортостан, Чувашская Республика, Самарская область	Баранина, свинина, молоко
3	Республика Северная Осетия-Алания, Республика Саха (Якутия)	Баранина, свинина, молоко, овощи
4	Ивановская, Орловская, Смоленская, Калининградская, Кировская, Ульяновская и Курганская области, Хакасия и Чеченская Республики, Пермский край	Баранина, свинина, молоко, картофель
5	Брянская, Воронежская, Ростовская и Иркутская области	Баранина, свинина, молоко, картофель, овощи
6	Республика Тыва	Баранина, свинина, молоко, яйца
7	Калужская, Ярославская, Пензенская и Челябинская области, Республики Крым, Марий Эл и Мордовия, Ставропольский и Приморский края	Мясо в целом, баранина, свинина, молоко, картофель
8	Московская, Ленинградская, Тюменская и Томская области	Мясо в целом, баранина, овощи свинина, молоко, картофель,
9	Новгородская область	Мясо в целом, баранина, яйца, свинина, молоко, картофель
10	Республика Калмыкия	Говядина, баранина, картофель, овощи
11	Республика Дагестан	Говядина, свинина, баранина, молоко, овощи
12	Кабардино-Балкарская и Карачаево-Черкесская Республики	Говядина, свинина, баранина, молоко, картофель
13	Волгоградская и Сахалинская области, Республика Ингушетия, Забайкальский край	Говядина, свинина, баранина, молоко, картофель, овощи
14	Магаданская область	Мясо в целом, говядина, свинина, молоко, картофель
15	Мурманская область	Мясо в целом, говядина, свинина, молоко, яйца
16	Республика Карелия, Саратовская и Свердловская области, Алтайский и Красноярский края	Мясо в целом, говядина, свинина, баранина, молоко

№	Группа региональных АПС	Самообеспеченность снижается по продуктам:
17	Вологодская и Астраханская области	Мясо в целом, говядина, молоко, свинина, баранина, картофель
18	Владимирская, Костромская, Рязанская, Архангельская, Тверская, Псковская, Нижегородская, Новосибирская, Омская Оренбургская и Амурская области, Республики Коми, Бурятия, Татарстан и Удмуртия, Краснодарский, Камчатский и Хабаровский края, Еврейская АО	Все, кроме мяса птицы, яиц и картофеля
19	Курская, Липецкая, Тамбовская, Тульская и Кемеровская области, Республика Адыгея	Все, кроме мяса птицы и яиц
20	Белгородская область	Все, кроме овощей

Источник: составлена на основе расчетов авторов

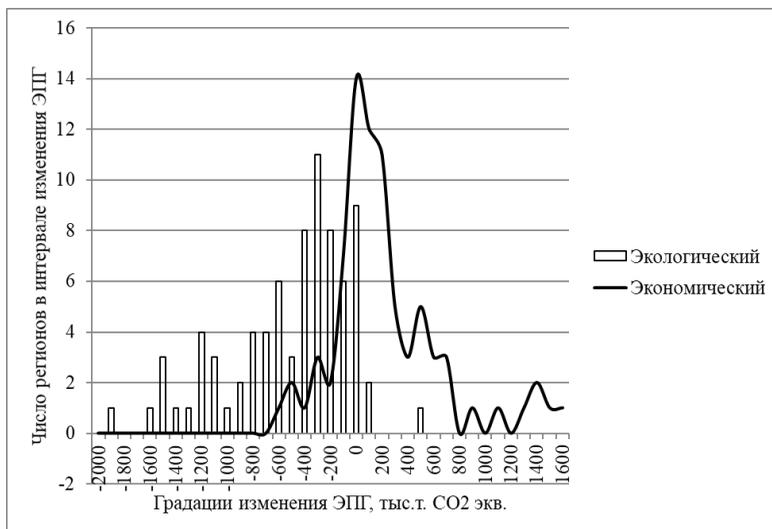
Таблица 6 – Экологические показатели низко углеродной трансформации АПС России

Экологические показатели низко углеродной трансформации АПС России, тыс. т. в CO ₂ эквиваленте	Прирост "вариант-факт"		Доля регионов с уменьшенной ЭПГ, %	
	«Эко-номи-ческий»	«Эко-логи-ческий»	«Эко-номи-ческий»	«Эко-логи-ческий»
Изменения углеродного следа посевных площадей	-1165,3	-59107,6	58,2	96,2
Изменения углеродного следа пастбищ и сенокосов	9529,1	-18255,4	1,3	87,3
Изменения углеродного следа многолетних насаждений	-2445,8	-12179,1	91,1	88,6
Изменения углеродного следа залежей	-1537,8	-3065,7	50,6	93,7
Изменения углеродного следа лесных массивов	-3091,6	-8349,5	69,6	82,3
Изменения углеродного следа животноводства	12527,4	-4048,7	24,1	93,7

Источник: составлена на основе расчетов авторов

Распределение регионов по величине прироста ЭПГ для двух стратегий показано на рисунке 3. Можно видеть левостороннее смещение регионов в область отрицательных значений приростов ЭПГ для «экологического» варианта. При этом в большинстве регионов

наблюдаются небольшие по модулю величины аккумуляции углерода, а в 9 случаях – нулевые. Для «экономического» варианта стратегии характерно более симметричное распределение регионов, смещенное в область положительных объемов ЭПГ, хотя и в этом случае присутствуют региональные АПС с накоплением углерода.



Источник: выполнен на основе расчетов авторов

Рисунок 3 – Распределение регионов по интервалам изменения ЭПГ

Стратегия «жесткой» декарбонизации приводит к недопустимо большим потерям в развитии сельского хозяйства, что показано в таблице 7.

Таблица 7 – Темпы роста валового дохода в растениеводстве и животноводстве при двух стратегиях декарбонизации

Показатели экономической эффективности	«Экономический»	«Экологический»
Индекс роста валового дохода на пашне, %	131,3	84,3
Индекс роста валового дохода животноводства, %	135,7	100,2

Источник: составлена на основе расчетов авторов.

Оценим теперь потенциал декарбонизации, под которым мы условились считать приращение секвестрации углерода в региональных АПС и суммарно в АПС Российской Федерации. В случае реализации «жесткой» стратегии прирост секвестрации углерода по сравнению с фактом составит 11,7% или 59108 тыс. т в CO₂-эквиваленте, что при средней мировой цене в 40 долл. США за углеродную единицу соответствует ≈236,4 млрд руб. и не покрывает возникающих при этом потерь продукции животноводства в ≈667 млрд руб. (по данным 2023 года).

В зависимости от исходного состояния, почвенно-климатических особенностей, иных факторов производства, отношение региональных АПС к проблеме низко углеродной трансформации может быть различным. Введем в рассмотрение три индекса, интегрально характеризующих социальные, экономические и экологические аспекты низко углеродной трансформации. Значения каждого из индексов положим равным среднему числу позитивно (≥ 0) прирастающих показателей в двух группах признаков: 9 показателей прироста самообеспеченности продовольствием – для первого индекса, 26 показателей для приростов, связанных со структурой землепользования, с отраслями растениеводства и животноводства и их производственными характеристиками, 13 показателей (≤ 0) для изменений углеродного следа эмитентов парниковых газов. Таким образом, с каждым регионом будут связаны три оговоренных индекса и появляется возможность упорядочить множество региональных АПС, используя подходящую процедуру агрегирования их индикаторов. Упорядочим регионы по отношению к региону-лидеру. Очевидно, что для региона-лидера значения всех трех индексов равны 1. Перед АПС такого виртуального региона стоит стратегическая задача масштабных

структурных изменений, которые могут привести к снижению углеродного следа всех источников парниковых газов и положительным изменениям самообеспеченности населения всеми учтенными видами продовольствия. В этом контексте далекие от лидера региональные АПС – благополучные субъекты, перед которыми остро не стоят задачи структурных трансформаций. В таблице 8 показано распределение регионов по агрегированному индексу, равному расстоянию до региона-лидера, которое вычислено в евклидовой метрике. Если все регионы разбить на две группы, то в первом столбце таблицы 8 находятся субъекты с высокой и средней потребностью в декарбонизации, тогда как в правом столбце эта потребность выражена в меньшей степени.

Таблица 8 – Распределение регионов по расстоянию до региона-лидера

Регионы	Индекс социально-экономической и экологической трансформации АПС	Регионы	Индекс социально-экономической и экологической трансформации АПС
Костромская область	0,38	Воронежская область	0,72
Республика Тыва	0,43	Хабаровский край	0,72
Республика Алтай	0,54	Чувашская Республика	0,72
Республика Бурятия	0,54	Нижегородская область	0,72
Республика Коми	0,53	Калининградская область	0,73
Республика Саха (Якутия)	0,53	Пермский край	0,73
Чеченская Республика	0,51	Оренбургская область	0,73
Республика Дагестан	0,53	Республика Башкортостан	0,73
Иркутская область	0,53	Омская область	0,73
Магаданская область	0,68	Республика Карелия	0,73
Смоленская область	0,53	Еврейская АО	0,76
Карачаево-Черкесская Республика	0,53	Республика Татарстан (Татарстан)	0,76
Республика Калмыкия	0,56	Брянская область	0,75

Регионы	Индекс социально-экономической и экологической трансформации АПС	Регионы	Индекс социально-экономической и экологической трансформации
Мурманская область	0,62	Кемеровская область	0,77
Сахалинская область	0,58	Ставропольский край	0,77
Республика Хакасия	0,59	Республика Северная Осетия-Алания	0,78
Калужская область	0,58	Саратовская область	0,78
Камчатский край	0,65	Московская область	0,78
Ярославская область	0,58	Белгородская область	0,79
Тверская область	0,59	Республика Марий Эл	0,79
Томская область	0,59	Тюменская область	0,79
Курганская область	0,61	Свердловская область	0,80
Астраханская область	0,62	Республика Крым	0,80
Вологодская область	0,65	Ульяновская область	0,80
Чукотский АО	0,70	Самарская область	0,80
Ивановская область	0,64	Пензенская область	0,81
Республика Ингушетия	0,68	Республика Адыгея	0,82
Архангельская область	0,67	Волгоградская область	0,82
Челябинская область	0,64	Ростовская область	0,84
Кабардино-Балкарская Республика	0,67	Липецкая область	0,86
Амурская область	0,67	Республика Мордовия	0,86
Новосибирская область	0,66	Орловская область	0,86
Удмуртская Республика	0,69	Краснодарский край	0,86
Кировская область	0,69	Красноярский край	0,86
Забайкальский край	0,69	Курская область	0,88
Приморский край	0,69	Тамбовская область	0,88
Алтайский край	0,69	Тульская область	0,88
Псковская область	0,71	Новгородская область	0,89
Рязанская область	0,71	Ленинградская область	0,90
Владимирская область	0,71		

Источник: составлена на основе расчетов авторов

Сделаем некоторые выводы из полученных результатов.

1.Реализация стратегий низко углеродной трансформации приводит к широкомасштабным структурным сдвигам АПС регионов.

2. Прирост посевных площадей, имеющих место во всех регионах, осуществляющих сельскохозяйственную деятельность, является важным показателем экономического развития АПС России в случае реализации стратегии с низкими углеродными нагрузками.

3. Углеродная нагрузка на животноводство приводит к смещению отраслевой структуры в сторону поголовья животных с низкими удельными выбросами парниковых газов: мясной и яичной птицы, при этом даже небольшая углеродная нагрузка приводит к уменьшению поголовья молочных коров.

4. Стратегия изменения отраслевой структуры в растениеводстве и животноводстве в случае малых углеродных нагрузок улучшает самообеспеченность населения по большинству видов продовольствия, способствуют росту показателей продовольственной безопасности.

5. Снижение ЭПГ в сельском хозяйстве и землепользовании существенно зависит от принятой стратегии и, по нашим оценкам, не превышает 12% по отношению к фактическому состоянию. Очевидно, что объем выбросов может быть сокращен в дальнейшем за счет инновационных технологических способов производства.

6. Виртуальные выгоды от реализации углеродных единиц в масштабах России не окупают потерь сельского хозяйства в случае реализации им «жесткой» стратегии декарбонизации.

Следует учитывать, что сделанные оценки носят детерминированный характер и не учитывают неопределенностей в измерении многих входных переменных, отражающих особенности региональных АПС.

3 Комплексный анализ полученных результатов с учетом критериев эффективности и устойчивости региональных АПС с точки зрения продовольственной безопасности России в целом

В полном согласии с принятой в нашей стране «Стратегией социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.» (далее – Стратегия) отечественной экономике необходимо достичь уровня углеродной нейтральности. По информации материалов [30]: «В ноябре 2022 г. эксперты Института народнохозяйственного прогнозирования (ИНП) РАН в своем докладе заявили, что санкции ограничили возможности России по сокращению выбросов парниковых газов. По их мнению, Россия не сможет реализовать часть мероприятий по декарбонизации экономики из-за введенных ограничений. Эмиссия выбросов CO₂ снизится к 2050 г. до 1,119 млрд. т вместо запланированных стратегическими документами 630 млн. т CO₂. Таким образом, потенциал России по сокращению выбросов парниковых газов сократится примерно вдвое» [30]. Эти экспертные оценки доказывают повышенную сложность достижения заданных Стратегией целевых установок. Тем не менее, судя по последним публикациям Министерства экономического развития Российской Федерации работа по реализации Стратегии непременно продолжится, причем качество выполнения задач по климатической повестке будет определять эффективность развития отечественной экономики [31].

В выполнении заданных целей есть и значительная роль аграрной экономики, несмотря на то, что предлагаемые ее специалистами на западе способы решения выглядят мало реалистичными, а требования к изменению пищевых вкусов

потребителей (такие, как минимизация потребления мяса и мясопродуктов) чрезмерными. Однако, как доказано в исследовательских публикациях С. О. Сиптица, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимовой, в современном агропродовольственном секторе экономики есть значительный потенциал декарбонизации, который может быть освоен, как структурными, так и технологическими нововведениями, которые будут составляющими суть климатических проектов в сельском хозяйстве [32, 33].

3.1 Методика оценки эколого-экономической эффективности отраслей животноводства в регионах России

Цель исследования в данном разделе состоит в получении оценок регионального производства животноводческой продукции, сопровождающегося ЭПГ [29]. При этом для эколого-экономической характеристики, отражающей эффективность функционирования отраслей животноводства, используем показатель, равный отношению выпуска белка животного происхождения к объему ЭПГ, полученной при этом производстве. Кроме этого для оценки и анализа, возникающих в этом случае тенденций выполним краткосрочный прогноз названных показателей, а также самообеспеченности населения регионов в рамках инерционного сценария.

Как известно, основными эмитентами метана и закиси азота в отраслях животноводства, являются жвачные животные, а объемы эмиссии в первом приближении пропорциональны поголовью, которое в рамках «зеленой повестки» должно бы снижаться. Посмотрим – так ли это в разных странах? Для этого определим темпы прироста поголовья крупного рогатого скота в 67 странах на всех континентах. На

рисунке 4 показано распределение стран по интервалам градации темпов прироста поголовья.



Источник: выполнен на основе расчетов авторов

Рисунок 4 – Распределение стран по темпам прироста поголовья КРС на интервале 2010 – 2020 годы

Мы видим практически симметричное близкое к нормальному распределение, свидетельствующее о том, что «зеленая повестка» еще не стала мировым императивом для большинства стран. Что касается поголовья КРС, то только в половине стран, где сосредоточено 26,4% мирового поголовья, имеется тенденция к его сокращению. В их число входят как развитые страны: США, Великобритания, Франция, Германия, Швейцария, так и развивающиеся: Вьетнам, Румыния, Молдова и пр. Такая картина говорит о наличии разных факторов, определяющих эти процессы. Структурные сдвиги в отраслях животноводства каждой страны, в том числе и в отраслях молочного и мясного скотоводства, имеют очевидные социально-экономические последствия, проявляющиеся в обеспечении населения животноводческой продукцией.

Сфокусируем свое внимание на состоянии и тенденциях развития животноводства в регионах России.

Информационной базой исследования являются региональные данные о поголовье и продуктивности в отраслях животноводства, демографические прогнозы в форме временных рядов. Выбросы парниковых газов оценивались в рамках первого подхода по методике МГЭИК [34]. Горизонт краткосрочного прогноза выбран до 2030 г., что позволяет получать прогнозируемые оценки с допустимой достоверностью, суждение о которой возможно на экспертном уровне.

У проблемы прогнозирования коротких временных рядов, образующих панельные данные, не существует хороших решений. Обычно для этих целей используются простейшие методы экстраполяции или ограничиваются формулировкой тех или иных сценариев, увязывая логически сценарные допущения с ходом прогнозируемых показателей.

Кажущейся альтернативой является обращение к аппарату экономико-математического моделирования, с помощью которого можно описать поведение агрегированного до уровня региона производителя животноводческой продукции и, в частности, динамику поголовья животных в соответствующих отраслях. При этом базовая проблема неопределенности прогнозируемых состояний системы лишь видоизменяется: задача прогнозирования выходных показателей, например, поголовья, заменяется на не менее сложную задачу прогнозирования характеристик внешнего окружения отраслей животноводства, определяющих в соответствии с модельными представлениями ее динамику. К этому добавляется необходимость калибровки модели, которая часто бывает не проще исходной. В этой связи разумным компромиссом между желанием получить

аналитическую картину будущих состояний отраслей животноводства, рассматриваемых с позиции трех критериев: экономического, экологического и социального, может быть следующий алгоритм прогноза:

–считается, что будущая динамика поголовья отраслей животноводства регионального уровня, детерминируется предыдущими значениями с лагом 3, 4 и 5 лет;

–на этих лагах определяются значения угловых коэффициентов линейных прогнозных зависимостей по трем, четырем и пяти точкам, соответственно;

–определяются минимальное, медианное и максимальное значение угловых коэффициентов;

–для прогнозирования поголовья стад с быстрым воспроизводством численности используется линейная зависимость с медианным угловым коэффициентом, а зона неопределенности располагается между прямыми с минимальным и максимальным угловыми коэффициентами;

–отрицательные значения поголовья на прогнозном интервале заменяются нулевыми и тракуются как выбытие из отраслевой структуры животноводства региона;

–поголовье молочных коров, а также годовые надои экстраполируются с использованием логарифмических зависимостей в каждой из категорий хозяйств: СХП, КФХ, ЛПХ с последующим расчетом средневзвешенной молочной продуктивности.

Этот алгоритм, с нашей точки зрения, можно отнести к экспертным процедурам прогнозирования в рамках инерционного сценария развития животноводства в регионах Российской Федерации

(из-за отсутствия информации новые регионы России в анализ не включены).

Таким образом, прогнозирование показателей эколого-экономического состояния отраслей животноводства регионов, а также обеспеченности населения белком животного происхождения соответствует следующей расчетной схеме, в которой определены известные множества (формулы 24-31):

$$N_{ij}(\tau) = \max\{\varphi_{ij}(\tau), 0\}, i = [1; 79], j \in J, \tau = [1; 6], \quad (24)$$

$$Lp_{ijk}(\tau) = \epsilon_{ijk} \times N_{ij}(\tau), \epsilon_{ij} = \overline{\epsilon_{ijk}(-3), \epsilon_{ijk}(-1)}, \quad (25)$$

$$g^i_i(\tau) = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} Lp_{ijk}(\tau) \times p_{ijk}(0), \quad (26)$$

$$Pr_i(\tau) = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \rho_{kj} \times \delta_{jk} \times Lp_{ijk}(\tau), \quad (27)$$

$$Cf_i(\tau) = N_{ij}(\tau) \times \sum_{j \in J} \{21 \times (\text{met}_{ij} + \text{man}_j) + 298 \times \text{nit}_j\}, \quad (28)$$

$$\pi_i(\tau) = \frac{Pr_i(\tau)}{DM_i(\tau)}, \quad (29)$$

$$ppr_i(\tau) = \frac{g^i_i(\tau)}{Pr_i(\tau)}, \quad (30)$$

$$PC_i(\tau) = \frac{Pr_i(\tau)}{Cf_i(\tau)}, \quad (31)$$

$$ppc_i = \frac{g_i(\tau)}{Cf_i(\tau)}, \quad (32)$$

где $J = \{\text{коровы, свиньи, овцы и козы, птица сельскохозяйственная}\}$;
 $K = \{\text{мясо КРС, мясо свиней, мясо овец и коз, мясо птицы, молоко, яйцо куриное}\}$;

$N_{ij}(\tau)$ – поголовье j -го вида животных в i -м регионе в прогнозном году τ ;

$\varphi_{i1}(\tau) = \max\{N_{ij}(0) + k_{ij} \times \tau; 0\}$ – для молочных коров;

$\varphi_{ij}(\tau) = a_{ij} \times \ln(\tau) + b_{ij}$;

$j = [2; 4]$ – для остальных отраслей животноводства;

a_{ij}, b_{ij} – параметры;

$Lp_{ijk}(\tau)$ – производство k -й продукции j -й отрасли животноводства в i -м регионе в прогнозном году τ ;

$\epsilon_{ijk} = \overline{\epsilon_{ijk}(-3), \epsilon_{ijk}(-1)}$, – удельный выпуск k -й продукции j -й отрасли (кроме молочного животноводства), осредненный за три последних года, предшествующих первому прогнозному; экстраполяция надоев молока выполнена с использованием логарифмической зависимости;

$g_i(\tau)$ – валовой доход от реализации продукции животноводства i – го региона;

$p_{ijk}(0)$ – цена реализации k -й продукции производителя j -й отрасли в i -м регионе; все оценки на прогнозных интервалах выполняются в ценах последнего года, предшествующего прогнозному;

$Pg_i(\tau)$ – производство белка животного происхождения в i – м регионе;

ρ_{kj} – содержание белка в k -й продукции животноводства j –го вида;

δ_{jk} – коэффициенты выхода k -й продукции из сырья j –го вида;

$Cf_i(\tau)$ – ЭПГ отраслями животноводства в i – м регионе;

met_{ij}, man_j, nit_j – нормативы эмиссии метана энтерального происхождения, эмиссии метана из навоза, прямой эмиссии закиси азота из навоза;

$\pi_i(\tau)$ – обеспеченность населения региона белком животного происхождения собственного производства;

$DM_i(\tau)$ – численность населения в i –м регионе, в соответствии с выбранным сценарием;

$ppr_i(\tau)$ – удельный валовой доход на единицу произведенного животного белка;

$PC_i(\tau)$ – производство животного белка на единицу ЭПГ в CO_2 – эквиваленте;

ppr_c – удельный валовой доход на единицу углеродного следа.

Нормативные значения ЭПГ в отраслях животноводства приведены в нижеследующей таблице 9.

Таблица 9 – Нормативы ЭПГ по видам животных, кг/гол./год

Виды животных	Метан энтеральный	Метан из систем сбора, хранения обработки навоза (помета)	Азот из систем сбора, хранения и обработки навоза (помета)
Коровы	*	22,00	63,88
Свины	1,30	3,00	17,74
Овцы и козы	8,00	0,19	13,14
Птица сельскохозяйственная	0	0,03	0,60

Источник: составлена авторами на основе материалов [34]

В таблице 9 значение «*» в зависимости от молочной продуктивности вычисляется по формуле 33:

$$met_{i1} = (0,0278 \times LN(1000 \times U) - 132,7), \text{ т/гол/год}, \quad (33)$$

где U – среднесуточный удой, кг.

Варианты расчетов зависят от сочетания следующих параметров:

–угловых коэффициентов линейных аппроксимаций, минимального, медианного, максимального;

–демографического сценария: низкого, среднего, сильного;

–распределения поголовья молочных коров между СХП, КФХ, ЛПХ.

Таким образом, [36] данная схема оценки и прогноза состояний отраслей животноводства регионов способна моделировать большое разнообразие вариантов их развития, оценить вариацию показателей, как во времени, так и в географическом аспекте, разумеется, в предположении о независимости названных параметров.

Прогнозные показатели животноводства регионов, полученные в соответствии с формулами (24) – (32), представляют собой оценки стратегии отраслей в рамках инерционного сценария их развития.

Сгруппируем регионы по сочетанию следующих показателей:

1)среднедушевому производству животного белка,

2)темпу его прироста на прогнозном интервале,

3)оплате выбросов парниковых газов от производства животного белка,

4)удельным валовым доходом животноводческой продукции на единицу ЭПГ.

Очевидно, что высокие значения перечисленных показателей, положительно характеризуют животноводство региона с эколого-экономических позиций. С содержательной точки зрения регионом-лидером будет субъект, максимально приблизившийся к виртуальному региону с максимальными значениями каждого показателя. Для

ранжирования регионов по четырем критериям расстояние до виртуального региона-лидера определяется по формуле (34):

$$r_i = \sqrt{\sum_{n=1}^4 (\pi_{ni}^{max} - \pi_{ni})^2}, \quad (34)$$

где r_i – расстояние i -го региона до виртуального лидера с максимальным уровнем каждого из четырех показателей.

Такой метод не лишен недостатков, связанных с отсутствием однозначности отношения «много к одному», что дает возможность располагаться на одном расстоянии от виртуального лидера нескольким регионам с разными сочетаниями признаков. Этот эффект в значительной мере устраняется в рейтинговых процедурах, где место региона в таблице рейтингов определяется суммой номеров мест в частных порядках по каждому показателю. При этом, как показывает практика, случаи с совпадающими баллами в рейтинговой таблице относительно редки.

В таблицах 10-13 приведена группировка всех регионов Российской Федерации по выше перечисленным показателям с использованием двух методов, а в качестве компромисса для оценки состояний животноводства регионов на прогнозном интервале использованы медианные значения, полученных оценок. В результате ранжирования регионов по медианному значению выделены несколько групп.

Таблица 10 – Первая группа ранжирования регионов по четырем показателям разными способами

№	Регионы	Расстояние до виртуального региона-лидера	Рейтинговая процедура	Медианные значения
1	Республика Саха (Якутия)	0,26	0,28	0,27
2	Республика Тыва	0,35	0,4	0,37
3	Карачаево-Черкесская Республика	0,12	0,64	0,38
4	Орловская область	0,22	0,58	0,4
5	Астраханская область	0,23	0,61	0,42
6	Курская область	0,19	0,69	0,44
7	Тверская область	0,23	0,68	0,46
8	Чеченская Республика	0,31	0,61	0,46
9	Республика Алтай	0,4	0,53	0,47
10	Воронежская область	0,27	0,67	0,47
11	Еврейская АО	0,4	0,54	0,47
12	Тульская область	0,22	0,75	0,49
13	Республика Северная Осетия-Алания	0,85	0,15	0,5
14	Курганская область	0,43	0,58	0,51
15	Забайкальский край	0,51	0,53	0,52
16	Чувашская Республика	0,32	0,72	0,52
17	Брянская область	0,41	0,63	0,52
18	Республика Калмыкия	0,84	0,21	0,52

Источник: рассчитано авторами

В таблице 10 перечислены регионы с наилучшими характеристиками с точки зрения эколого-экономической эффективности производства животноводческой продукции. Для них характерен высокий уровень производства белка на 1-го человека в год, при этом на единицу ЭПГ производится наибольшее количество белка (таблица 10).

Таблица 11 – Вторая группа ранжирования регионов по четырем показателям разными способами

№	Регионы	Расстояние до виртуального региона-лидера	Рейтинговая процедура	Медианные значения
19	Омская область	0,44	0,68	0,56
20	Камчатская область	0,48	0,67	0,57
21	Тамбовская область	0,43	0,71	0,57
22	Липецкая область	0,39	0,76	0,57
23	Пермская область	0,41	0,74	0,57
24	Иркутская область	0,49	0,67	0,58
25	Калужская область	0,49	0,67	0,58
26	Пензенская область	0,32	0,84	0,58
27	Кировская область	0,44	0,73	0,59
28	Белгородская область	0,44	0,74	0,59
29	Архангельская область	0,52	0,67	0,59
30	Республика Адыгея	0,48	0,71	0,6
31	Республика Бурятия	0,66	0,54	0,6
32	Псковская область	0,57	0,63	0,6
33	Рязанская область	0,42	0,79	0,6
34	Самарская область	0,54	0,67	0,6
35	Кабардино-Балкарская Республика	0,57	0,65	0,61
36	Смоленская область	0,56	0,67	0,61
37	Республика Крым	0,51	0,73	0,62
38	Калининградская область	0,55	0,69	0,62
39	Оренбургская область	0,51	0,73	0,62
40	Ставропольский край	0,47	0,77	0,62
41	Удмуртская Республика	0,49	0,75	0,62
42	Республика Карелия	0,56	0,68	0,62
43	Саратовская область	0,56	0,7	0,63
44	Республика Хакасия	0,71	0,55	0,63
45	Республика Ингушетия	0,6	0,68	0,64
46	Томская область	0,59	0,7	0,64
47	Амурская область	0,59	0,7	0,65
48	Волгоградская область	0,6	0,69	0,65
49	Ростовская область	0,53	0,76	0,65
50	Костромская область	0,46	0,84	0,65

Источник: рассчитано авторами

Таблица 12 – Третья группа ранжирования регионов по четырем показателям разными способами

№	Регионы	Расстояние до виртуального региона-лидера	Рейтинговая процедура	Медианные значения
51	Республика Башкортостан	0,6	0,73	0,67
52	Магаданская область	0,9	0,45	0,67
53	Новосибирская область	0,64	0,74	0,69
54	Ульяновская область	0,7	0,69	0,7
55	Вологодская область	0,63	0,78	0,71
56	Тюменская область	0,58	0,85	0,71
57	Ленинградская область	0,62	0,81	0,72
58	Ярославская область	0,56	0,88	0,72
59	Республика Дагестан	0,89	0,56	0,72
60	Ивановская область	0,64	0,83	0,74
61	Кемеровская область	0,61	0,86	0,74
62	Красноярский край	0,76	0,72	0,74
63	Республика Марий Эл	0,73	0,75	0,74
64	Алтайский край	0,76	0,73	0,74
65	Краснодарский край	0,76	0,74	0,75
66	Новгородская область	0,77	0,74	0,75
67	Республика Мордовия	0,69	0,81	0,75
68	Приморский край	0,77	0,74	0,75
69	Республика Татарстан	0,84	0,68	0,76
70	Мурманская область	1	0,53	0,77
71	Московская область	0,86	0,69	0,77
72	Хабаровский край	0,69	0,86	0,78
73	Владимирская область	0,74	0,82	0,78
74	Республика Коми	0,82	0,73	0,78

Источник: рассчитано авторами

В остальных регионах, представленных в нижеследующих таблицах 11-13, средние групповые характеристики уменьшаются. Самыми неэффективными в эколого-экономическом смысле регионы представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Четвертая группа ранжирования регионов по четырем показателям разными способами

№	Регионы	Расстояние до виртуального региона-лидера	Рейтинговая процедура	Медианные значения
75	Нижегородская область	0,82	0,78	0,8
76	Челябинская область	0,77	0,83	0,8
77	Чукотский АО	0,68	1	0,84
78	Свердловская область	0,86	0,83	0,84
79	Сахалинская область	0,99	0,72	0,86

Источник: рассчитаны авторами

В таблице 14 представлены средние групповые значения обсуждаемых удельных характеристик, к которым добавлено «доля регионов в группе, у которых душевое производства животного белка больше или равно нормативному» [36].

Таблица 14 – Групповые эколого-экономические и социальные характеристики регионов

Группы регионов	Душевое производство животного белка, т/год	Темп прироста душевого производства белка, %	Оплата ЭПГ белком, б/р	Удельный валовой доход на единицу животного белка, млн. руб./т	Доля регионов с нормативным или более душевым производством белка, %
1	0,063	13,03%	0,149	1,749	66,67%
2	0,044	9,62%	0,114	0,702	64,52%
3	0,029	-2,57%	0,113	0,220	30,43%
4	0,007	-1,94%	0,104	0,128	4,35%

Источник: рассчитаны авторами

Выводы. Анализ и прогнозирование результатов развития отраслей животноводства в регионах России, несомненно, является актуальной и непростой проблемой. Оценить состояние и тенденции этого сектора аграрной экономики с эколого-экономических и социальных позиций тем более сложно в связи с необходимостью

рассмотрения процессов низко углеродной трансформации отраслей животноводства. При этом отношения, возникающие в системе «социум-экономические интересы производителя животноводческой продукции-низко углеродная стратегия развития экономики, принятая государством» носят явно противоречивый характер, а механизмы достижения компромисса сложны и пока не разработаны. Рассмотренный в данном разделе способ оценки результатов инерционного сценария эволюции отраслей животноводства в регионах не свободен от недостатков и условностей, связанных с прогнозированием динамики коротких временных рядов. Авторы относят его к разряду гибридных экспертных процедур. Такие процедуры сочетают некоторое количество гипотез, сформулированных экспертным образом, с логически обоснованными количественными соотношениями. В результате возникает расчетная схема краткосрочного прогнозирования показателей развития отраслей животноводства, результаты которой носят условный характер с точностью до положенных в ее основу гипотез. Обратимся теперь к этим результатам. В данной работе состояние отраслей животноводства на прогнозном периоде агрегировано до душевого производства белка животного происхождения, к которому добавлены темпы его прироста, удельная доходность и оплата белком животного происхождения сопутствующего производства парниковых газов. По мнению авторов, возникает возможность описания в компактной форме упомянутой системы отношений между конечным потребителем животноводческой продукции, целями производителя и стратегическими ограничениями низко углеродного экономического развития. Группировка регионов-производителей животноводческой продукции по перечисленным критериям и возникающий региональный порядок дает возможность

уточнять направления и дифференцировать стратегии развития этого сектора аграрной экономики в краткосрочной перспективе.

3.2 Сравнительный анализ результатов расчетов с помощью системы «Декарбон СХ» по трем сценариям развития АПС России до 2035 года: «Базовый», «Инерционный», «Целевой»

Основным применяемым подходом в мировом исследовательском сообществе при оценке устойчивости и эффективности продовольственных систем в процессе низкоуглеродной трансформации является определение их способности обеспечить продовольственную безопасность [36]. Для этого в перечень показателей оценки (кроме показателей экологической устойчивости, таких как степень достижения углеродной нейтральности) включаются критерии, характеризующие продовольственную безопасность стран и регионов.

Этот подход применяется в исследованиях ФАО. В частности, продовольственная безопасность в этих документах определяется как состояние, при котором люди всегда имеют физический, социальный и экономический доступ к достаточному питанию, отвечающему их диетическим потребностям для здоровой и активной жизни [37]. Так, показатели продовольственной безопасности, применяемые в ФАО, объединены в четыре основные группы, – наличие продовольствия, доступ к продовольствию, экологическая устойчивость при производстве продовольствия и использование. Глобальный индекс продовольственной безопасности [38] оценивает уровень доступности, наличия и качества для 113 стран мира. Общая цель таких исследований

– оценить, какие страны наиболее и наименее уязвимы к проблеме продовольственной безопасности.

Рассмотрим основные понятия, применяемые для определения индикаторов оценки продовольственной безопасности на макроуровне за рубежом:

–Доступность: Измеряет способность потребителей покупать продукты питания, их уязвимость к ценовым шокам, а также наличие программ и политики поддержки потребителей в случае возникновения шоков.

–Доступ (наличие): Измеряет сельскохозяйственное производство и возможности фермерских хозяйств, риск перебоев в поставках, национальный потенциал по распространению продуктов питания и исследовательские усилия по расширению сельскохозяйственного производства.

–Качество и безопасность: Измеряет разнообразие и питательность среднестатистических рационов, а также безопасность пищевых продуктов.

–Устойчивость и адаптация: Оценивает подверженность страны к воздействию изменения климата; его восприимчивость к рискам, связанным с природными ресурсами; и как страна адаптируется к этим рискам [40, 41].

Определим показатели каждой из перечисленных категорий для исследования продовольственного обеспечения населения регионов России:

–под наличием продовольствия понимается объем производства по каждому виду агропродовольственной продукции;

–доступ к продовольственным ресурсам определяется как уровень развития торговой, товаропроводящей и дорожной инфраструктуры;

–экономическая доступность, определяется продовольственными ценами и доходами населения;

–качество и безопасность, определяется как уровень достижения среднестатистическим потребителем медицинских рекомендаций по структуре пищевого рациона;

–устойчивость и адаптация, измеряется степенью достижения целей устойчивого развития (ЦУР) в процессе сельскохозяйственного производства и потребления продовольствия.

Таблица 15 – Цели устойчивого развития АПС

Триада характеристик целей устойчивого развития	Цели устойчивого развития
Экономические	Эффективность производства агропродовольственной продукции
Социальные	Продовольственная безопасность
Экологические	Адаптация к климатическим изменениям при сокращении углеродного следа производимой агропродовольственной продукции

Источник: составлено авторами на основе материалов [40,41]

Одной из целей устойчивого развития является достижение заданного уровня сокращения углеродного следа к определенному году прогнозного периода при производстве сельскохозяйственной продукции. Кроме этого, в соответствии с отечественной Доктриной Продовольственной безопасности, основной целью является обеспечение населения продуктами питания за счет собственного производства в объеме и структуре, которые соответствуют рекомендуемым медицинским нормам [36].

Продовольственная безопасность определяется следующим образом: – это «состояние экономики страны, при котором обеспечивается продовольственная независимость Российской Федерации, гарантируется физическая и экономическая доступность для каждого гражданина страны пищевых продуктов, соответствующих требованиям законодательства Российской Федерации о техническом регулировании, в объемах не меньше рациональных норм потребления пищевых продуктов, необходимых для активного и здорового образа жизни» [38].

Продовольственная независимость страны – это самообеспеченность ее продуктами питания за счет собственного производства на уровне, определенном целевыми показателями, также представленными в Доктрине продовольственной безопасности нашей страны. Поэтому, под социальной эффективностью региональной АПС при ее низко углеродной трансформации в данной работе понимается возможность и степень достижения рекомендованных медицинских норм по потреблению основных продуктов питания (мясо, молоко, яйца, картофель и овощи) за счет собственного производства в регионах России [36].

Как было показано в предыдущем разделе, в результате решения задачи оптимизации отраслевой структуры по 3 критериям: экономическому, социальному и экологическому были определены варианты трансформации АПС регионов России и продовольственной системы страны в целом.

Стратегия включает два основных сценария – «инерционный» и «целевой» [38].

«Инерционный» сценарий предусматривает реализацию уже принятых решений по достижению национальных целей и задач

отраслевых документов стратегического планирования. Дополнительные меры, прямым или косвенным результатом которых является сокращение выбросов парниковых газов, этим сценарием не рассматриваются. Этот сценарий соответствует условиям «классического» сценария мирового развития, который предполагает сохранение современных климатических и социально-экономических трендов.

«Целевой» сценарий предполагает выполнение мер по трансформации социально-экономической системы Российской Федерации в сторону низко углеродной нейтральности, но не планирует ее достижение. Уменьшение ЭПГ для всей Российской экономики предполагается до 40% к 2030 г. и до 70% к 2050 году [38].

Итак, для периода до 2035 г. сценарий «Целевой» соответствует сценарию МГЭИК «середина пути», который зарубежными исследователями рассматривается как наиболее вероятный. В нашем исследовании для «Инерционного» сценария предполагается сохранение текущих тенденций производства и потребления, а для «Целевого» сценария тенденции развития экономики моделируются в соответствии с предположениями, которые показаны в таблице 16.

Макроэкономические предположения сценариев основаны на таком показателе, как численность населения. Так, для сценария «Базовый» численность населения предполагается равной населению России в 2023 году. Для сценария «Инерционный» численность населения России предполагается равной прогнозируемому значению Росстатом (средний прогноз).

Для сценария «Целевой» численность населения России также предполагается равной прогнозируемому значению Росстатом (низкий вариант прогноза). Параметр численности населения является

определяющим для оценки самообеспеченности продовольствием населения России в соответствии с рекомендованными значениями норм здорового питания к концу прогнозного периода, таких, как потребление продуктов животного происхождения в пищу.

Таблица 16 – Основные допущения сценариев развития АПС России

Макроэкономические индикаторы, климатические сценарии и динамика параметров	Сценарии		
	«Базовый»	«Инерционный»	«Целевой»
Климатический сценарий	Без изменения климатических параметров	Изменение климатических параметров в соответствии со сценарием RCP8.5	Изменение климатических параметров в соответствии со сценарием RCP4.5
Численность населения	На уровне 2023 года	Сохранение текущих тенденций динамики численности населения	«Низкий» прогноз Росстата
Экспорт продукции сельского хозяйства	На уровне 2023 года	Низкий	Средний
Потребление продуктов животного происхождения в пищу	Сохранение на современном уровне объемов потребления продуктов питания	Сохранение на современном уровне текущих тенденций потребления продуктов питания	Сокращение потребления отдельных продуктов животноводства в пищу
Параметры растениеводства и землепользования	Сохранение размеров площадей сельскохозяйственных угодий и лесонасаждений	Сохранение текущих тенденций динамики размеров площадей сельскохозяйственных угодий и лесонасаждений	Изменение структуры посевных площадей с увеличением доли культур, поддерживающих плодородие почвы и рост площадей лесонасаждений
Параметры животноводства	На уровне 2023	Сохранение текущих тенденций динамики поголовья скота и птицы	Сокращение поголовья КРС, свиней и овец, рост поголовья птицы

Источник: разработана авторами

Самообеспеченность продовольственной продукцией также зависит от объемов производства. Для сценариев «Базовый» и «Инерционный» предполагается сохранение существующих тенденций динамики посевных площадей. При этом урожайности сельскохозяйственных культур для сценария «Базовый» предполагаются равными средним значениям урожайностям за последние три года. Урожайности для сценария «Инерционный» рассчитываются, исходя из зависимостей, учитывающих климатические изменения по сценарию RCP8.5. «Целевой» сценарий для расчетов урожайностей использует климатические параметры климатического сценария RCP4.5. Кроме этого, данным сценарием предусмотрена возможность учета в функциях урожайностей и продуктивностей животных, результатов НТП и интенсификации сельского хозяйства, что обеспечивает их рост в соответствии с заданными экспертным путем параметрами. В целевом сценарии уменьшение посевных площадей и поголовья животных в рамках реализации низко углеродных стратегий развития АПС компенсируется ростом урожайностей культур и продуктивностей животных, что позволяет не снижать общие объемы сельскохозяйственного производства. «Инерционным» сценарием предусмотрено снижение эмиссии по отдельным позициям АПС от 1% до 5% к 2035 году. «Целевым» сценарием предполагается снижение эмиссии по отдельным позициям АПС на 30% к 2035 году.

Рассмотрим полученные результаты моделирования на уровне Российской Федерации. Анализ будем проводить путем сравнения трех сценариев – базового, инерционного и целевого. В таблице 17 представлены значения показателей землепользования в Российской Федерации по трем сценариям. Как видно из таблицы 17, по сравнению

с «Базовым» сценарием произошли изменения как в сценарии «Инерционном», так и в сценарии «Целевом».

Таблица 17 – Землепользование в России к 2035 году по сценариям, тыс. га

Показатели	Сценарий Базовый	Сценарий Инерционный	Сценарий Целевой
Посевные площади	80615,33	80615,33	70036,07
Пастбища и сенокосы	91450,50	92236,80	100352,30
Многолетние насаждения	1890,80	1923,77	1399,24
Залежи	4923,10	4911,66	6400,03
Всего, сельхозугодья	178879,73	179687,55	178187,64

Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон_СХ» [28]

Посевные площади уменьшились в «Целевом» сценарии и составили 70036,07 тыс. га, при этом в «Инерционном» сценарии размер посевных площадей не изменился по сравнению с «Базовым» сценарием и остался на уровне 80615,33 тыс. гектаров.

Площади кормовых угодий увеличились как в «Инерционном» сценарии, так и в «Целевом» сценарии. Так же в «Целевом» сценарии увеличились площади залежей. За счет этих структурных изменений удалось снизить углеродный след, как показано в таблице 18.

Таблица 18 – Углеродный след АПС России к 2035 году по выбранным сценариям

Показатели	Сценарий Базовый	Сценарий Инерционный	Сценарий Целевой
Углеродный след АПС, тыс.т. в CO ₂ -экв.	561890,6	563883,5	502783,0
в том числе: Пашня	700321,4	702913,8	682066,0
Пастбища и сенокосы	-125118,8	-126194,6	-137297,9
Многолетние насаждения	11852,49	12063,9	8786,8
Залежи	-27831,71	-27767,0	-36181,2
Лесные массивы	-38666,27	-38666,3	-42715,0
Животноводство	41333,51	41533,8	28115,8

Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

В таблице 19 показаны валовые сборы основных сельскохозяйственных культур по трем сценариям.

Таблица 19 – Валовые сборы в России по сценариям, тыс. т

Показатели	Сценарий Базовый	Сценарий Инерционный	Сценарий Целевой
Всего зерновые и зернобобовые	146315,59	126746,69	167300,62
Подсолнечник на зерно	19225,61	15695,55	11796,76
Соя	5938,95	5233,04	6169,96
Рапс озимый	1314,71	1151,70	622,21
Рапс яровой	2272,08	2227,28	1446,62
Лен-кудряш	1532,81	1455,76	1118,59
Свекла сахарная	47560,50	42328,62	30804,62
Лен-долгунец	26,31	26,76	20,71
Картофель	19065,10	18052,14	15508,87
Овощи открытого грунта	19227,68	18167,92	21053,05
Корнеплодные кормовые культуры	207,41	246,27	224,92
Свекла кормовая	15,22	0,00	0,00
Культуры кормовые на силос (без кукурузы)	1357,58	1225,46	1380,80
Кукуруза на корм	17569,97	15446,93	8922,85
Однолетние травы	5995,91	5474,20	3554,11
Многолетние травы	14268,46	13197,20	15085,94

Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

Как можно видеть в таблице 19, валовые сборы зерновых и зернобобовых культур растут при «базовом» сценарии до 167300,62 тыс. тонн. Однако, такой инерционный тренд приведет к уменьшению валовых сборов зерновых и зернобобовых культур до уровня 126746,69, что определяется климатическими изменениями и отсутствием адаптационных мероприятий, характерных для «Инерционного» сценария. В «Целевом» сценарии уменьшаются площади таких, ведущих к снижению запасов гумуса в почве, культур, как подсолнечник на зерно, лен, и пропашных культур, таких как сахарная свекла и картофель. Возрастает валовое производство многолетних трав, что связано с адаптационными мероприятиями «Целевого»

сценария, которые заключаются в увеличении в севообороте доли площадей многолетних трав, как одного из факторов, приводящего к увеличению депонирования углерода в почве и снижения в связи с этим ЭПГ. При этом производство некоторых кормовых культур снижается при реализации «Целевого» сценария (кукуруза на корм, однолетние травы). Такое снижение производства некоторых кормовых культур связано как с их меньшей способностью к поглощению углерода, так и с уменьшением поголовья крупного рогатого скота, что видно из нижеследующей таблицы 20.

Таблица 20 – Поголовье сельскохозяйственных животных и птицы в России к 2035 году по сценариям, тыс. голов

Показатели	Сценарий Базовый	Сценарий Инерционный	Сценарий Целевой
КРС, всего	21836	21836	12230
в т.ч. коровы	9371	9371	5344
Свины	25380	25380	18196
Овцы	25243	25243	13148
Птица	521419	521419	609670

Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

В таблице 21 показаны объемы производства продукции животноводства по трем сценариям.

Таблица 21 – Годовое производство продукции животноводства в России к 2035 году по сценариям

Показатели	Сценарий Базовый	Сценарий Инерционный	Сценарий Целевой
Производство мяса всего тыс. т	11925,62	11135,58	11439,99
в т.ч. говядины	1659,50	1415,28	926,08
свинины	4719,59	5474,83	3712,50
баранины	207,15	138,32	107,22
мяса птицы	5339,38	6169,35	6694,19
Производство молока, тыс. т	31331,50	29642,17	21159,64
Производство яиц, млн. шт.	44900,85	46866,91	81720,96

Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

Как видно из таблицы 21, в целом производство мяса практически не изменилось, однако произошли значительные изменения в структуре его производства.

В «Целевом» сценарии, как и ожидалось, исходя из заданных сценарных предположений, снизилось производство говядины и баранины, как основных продуктов, имеющих высокий углеродный след при их производстве. Объемы производства молока также снизились, поскольку уменьшилось поголовье молочных коров.

В таблице 22 показано снижение объема выбросов от отдельных категорий земельных ресурсов и АПС России в целом к 2035 г. при реализации целевого сценария по отношению к сценарию инерционному.

Таблица 22 – Снижение объема выбросов от отдельных категорий земельных ресурсов и АПС России в целом к 2035 году при реализации целевого сценария по отношению к сценарию инерционному, %

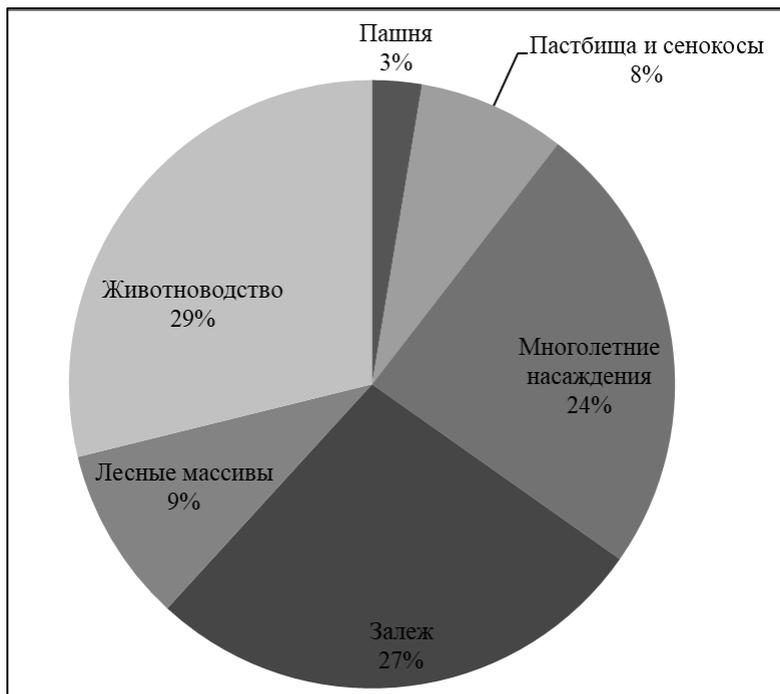
АПС России в целом	11%
Пашня	3%
Пастбища и сенокосы	9%
Многолетние насаждения	27%
Залежи	30%
Лесные массивы	10%
Животноводство	32%

Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

Как видно из таблицы 22, общее снижение углеродного следа составило 11%. Целевой показатель снижения углеродного следа до 32% может быть достигнут только в животноводстве. Увеличение площадей сенокосов и пастбищ дает снижение углеродного следа на 30%, увеличение площади залежи также дает снижение углеродного следа на 30%. Адаптационные мероприятия по совершенствованию структуры посевных площадей позволяют достигнуть только 3%

снижения углеродного следа в растениеводстве за счет депонирования углерода в почве.

На рисунке 5 показан вклад каждой категории земельных ресурсов и животноводства в общее снижение углеродного следа АПС России на 11%, который может быть получен в результате реализации «Целевого» сценария.



Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

Рисунок 5 – Структура общего объема снижения углеродного следа АПС России к 2035 г. при реализации целевого сценария по сравнению со сценарием инерционным

В таблице 23 представлены показатели прогнозной самообеспеченности продовольствием населения России к 2035 году по

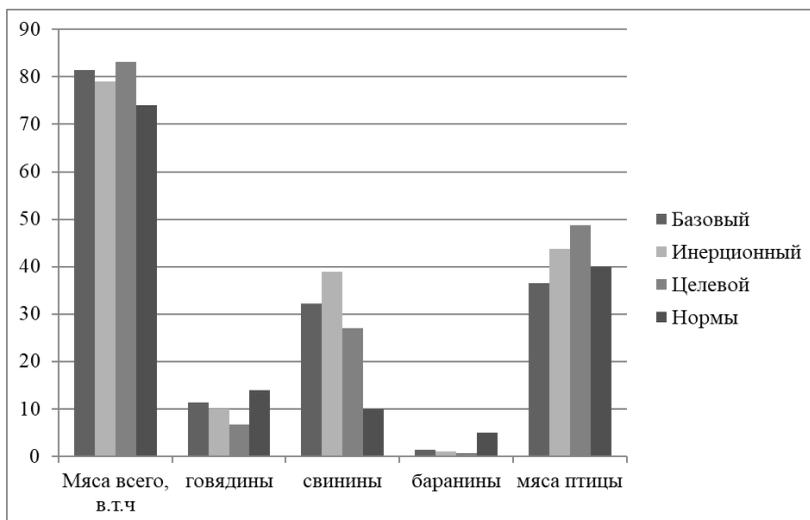
базовому, инерционному и целевому сценариям по сравнению с рекомендуемыми медицинскими нормами здорового питания.

Таблица 23 – Самообеспеченность продовольствием населения России к 2035 г. по сценариям по сравнению с рекомендуемыми нормами здорового питания

Производство продуктов на душу населения в год, кг	Базовый	Инерционный	Целевой	Нормы
Мяса всего, в.т.ч	81	79	83	74
говядины	11	10	7	14
свинины	32	39	27	10
баранины	1	1	1	5
мяса птицы	36	44	49	40
Молока	231	210	154	322
Яиц, шт.	307	332	594	270
Картофеля	130	128	111	90
Овощей	131	129	137	140

Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

Как видно из таблицы 23, к 2035 г. самообеспеченность продуктами питания населения России достигается практически по всем продуктам при реализации всех трех сценариев. Однако, при реализации низко углеродного сценария снижается самообеспеченность говядиной и молоком, а также не растет производство баранины. Это связано с уменьшением поголовья КРС в этом сценарии. Самообеспеченность мясом достигается за счет мяса птицы и свинины (рисунок 6). Однако региональные показатели самообеспеченности продовольствием отличаются значительно. Рассмотренные сценарии показывают, что как «Инерционный» сценарий, так и сценарий «Целевой», позволяют не снизить показатели эффективности АПС России в целом. Валовой доход на один гектар пашни в «Базовом» сценарии составляет 53,3 тыс. рублей. В «Инерционном» сценарии – 53,6 тыс. рублей. В «Целевом» сценарии этот показатель достигает уровня 54,7 тыс. руб. на 1 га пашни.



Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]
 Рисунок 6 – Самообеспеченность мясом и мясопродуктами населения России к 2035 г. по трем сценариям по сравнению с рекомендованными нормами здорового питания, кг/чел./год

Выводы. Как показано в данном разделе применяемые подходы к исследованию процесса низко углеродной трансформации региональных АПС основаны на следующих показателях. Экономическая эффективность сельскохозяйственного производства в региональных АПС оценивалась с помощью показателя валового дохода в расчете на 1 га пашни. Экологическая устойчивость в растениеводстве и землепользовании оценивалась с помощью показателей прироста объемов депонированного углерода на 1 га пашни. В животноводстве – процентом уменьшения ЭПГ при производстве продукции животноводства по видам, таких как КРС, свиньи, овцы, куры яичного и мясного направления. Социальный критерий состоял в нахождении вариантов с минимальными отклонениями самообеспеченности продовольствием регионов от

рекомендуемых норм здорового питания, что соответствует понятию физической доступности продовольствия, закрепленному в качестве критериальной оценки продовольственной безопасности страны. Полученные результаты показали, что такое решение существует и может быть получено при оптимизации производственной структуры региональных АПС по трем перечисленным выше критериям. При этом изменение производственной структуры АПС дает возможность существенным образом снижать выбросы парниковых газов при сохранении уровня доходов сельскохозяйственных товаропроизводителей от реализации сельскохозяйственной продукции [40]. Полученная в результате решения структура конечного потребления продукции собственного производства позволяет достигнуть медицинских норм по основным продуктам, таким как мясо и мясопродукты, картофель, овощи и яйца.

Соотношение объема продукции собственного производства и уровня ее потребления по рекомендованным нормам здорового питания, является не только показателем уровня продовольственной безопасности страны. Данный показатель также отражает возможность достижения на рынках сельскохозяйственной продукции устойчивого, близкого к равновесному состояния за счет собственных продовольственных ресурсов, что также обеспечивает и социальную устойчивость [41]. Далее будут рассмотрены проблемы устойчивости возможных стратегий низко углеродной трансформации АПС регионов в зависимости от планируемых нагрузок по снижению углеродного следа их функционирования, а также соотношение эффективности и устойчивости получаемых решений для регионов России.

3.3 Анализ устойчивости стратегий низко углеродной трансформации АПС регионов в зависимости от планируемых нагрузок по снижению углеродного следа их функционирования

Стратегии декарбонизации функционирования региональных АПС есть результат решения оптимизационных процедур, направленных на изменения отраслевых структур растениеводства и животноводства, а также на рационализацию землепользования. Любое стратегическое решение должно быть устойчивым, то есть сохранять свои свойства при изменениях параметров. В экономико-математических моделях этими параметрами могут быть любые характеристики внешней среды, например, цены, а также, разнообразные коэффициенты, входящие в описание технологических способов производства и ограничения.

Проблемам устойчивости оптимальных решений посвящено большое количество работ, подробный анализ которых не входит в нашу задачу. Обычно под устойчивостью оптимального решения понимают свойство решений оптимизируемой модели мало отклоняться от решения первоначального при малых отклонениях параметров. Устойчивость является важнейшим качеством оптимальных стратегий, оказывающим решающее влияние на принятие решение об их реализации. В идеальном случае можно представить себе следующую ситуацию: разработчику известны законы распределения вероятностей значений всех параметров, в его распоряжении имеется суперкомпьютер, с помощью которого он может получить множество оптимальных решений при случайных сочетаниях значений этих параметров. Анализируя это множество в общем случае, он может выделить несколько отличающихся друг от друга кластеров, объединяющих оптимальные решения и их порождающие сочетания

параметров. При единственном кластере мы можем говорить о единственной стратегии; в общем случае придется принимать решение о стратегии, учитывающей неоднородности кластерных структур или рассматривать вариант переключающихся стратегий, основанных на системе мониторинга параметров. По всей видимости, последняя задача может быть сложнее исходной.

Действительность такова, что на одно оптимальное решение (оптимизация производственной структуры растениеводства и животноводства, а также структуры землепользования для всех регионов РФ) затрачивается около 1,5 часов машинного времени, поэтому все параметры приходится считать детерминированными, образующими с содержательной точки зрения малое число сценариев. В этом единственными величинами, влияющими на соотношение между экономическими результатами и углеродным следом, являются весовые коэффициенты, определяющие отношение субъектов экономики к доходности производимой продукции в отраслях растениеводства и животноводства. Выполним следующий эксперимент для оценки влияния весового коэффициента при компоненте экологического критерия на результаты низко углеродной трансформации региональной АПС:

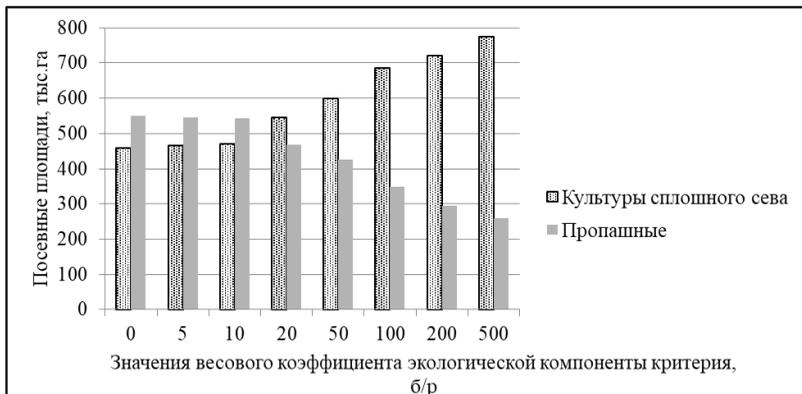
–выберем регион (в данном случае Белгородская область);

–зададим числовые значения весового коэффициента в некотором интервале, например, от 0 до 500;

–получим оптимальные решения для каждого значения весового коэффициента, состоящие из посевных площадей, урожайностей возделываемых культур, приростов по отношению к факту валового дохода и объема аккумулированного углерода в пахотном слое в CO₂-эквиваленте;

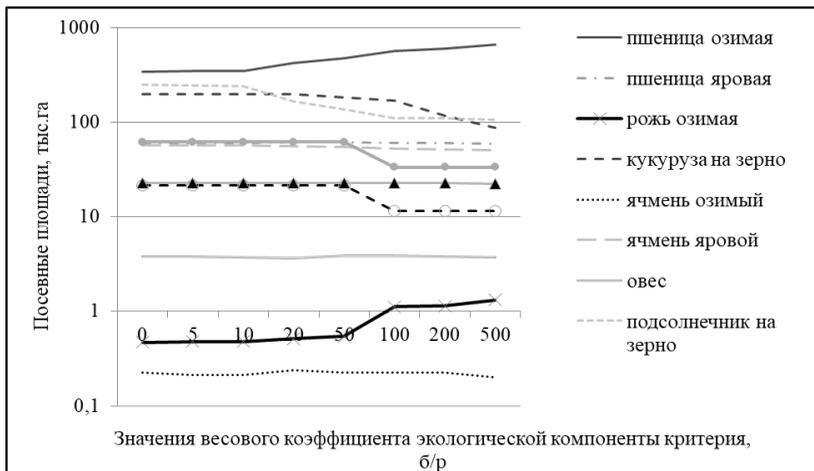
–построим график связи в координатах «относительная секвестрация углерода–относительная доходность», а также графики изменения посевных площадей основных культур в зависимости от весового коэффициента.

Напомним существо решаемой задачи при фиксированном значении весового коэффициента. Максимизируется критерий, равный сумме валового дохода и взвешенного объема аккумулярованного углерода гумуса за счет вариаций посевных площадей и доз минеральных удобрений. При этом урожайности сельскохозяйственных культур заданы в виде производственных функций минеральных и органических удобрений с учетом подвижных форм элементов почвенного плодородия. Каждая вариация посевных площадей и урожайностей в процессе поиска экстремума вызывает пересчет баланса гумуса в пахотном слое почвы. Собственно баланс гумуса зависит от массы корне-познивных остатков растений, которые, в свою очередь, связаны с урожайностями, учтена доза органических удобрений из расчета на 1 га севооборотной площади. Скорости процессов гумификации и минерализации органического вещества связаны с механическим составом почво-грунтов, преобладающих в данном регионе, класса сельскохозяйственной культуры (сплошного сева, пропашные, многолетние травы). На изменения валового дохода каждой культуры, как и на применяемые дозы минеральных удобрений, наложены двухсторонние ограничения. Общий объем внесения удобрений остается неизменным, сумма посевных площадей также не меняется. На следующем рисунке 7 показана зависимость посевных площадей культур сплошного сева и пропашных от возрастающих значений весового коэффициента.



Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]
 Рисунок 7 – Белгородская область. Соотношение посевных площадей культур сплошного сева и пропашных при нарастающих значениях весового коэффициента.

Внутри классов посевные площади сельскохозяйственных культур демонстрируют следующие закономерности (рисунок 8).



Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]
 Рисунок 8 – Замещение части площадей пропашных культурами сплошного сева по мере роста претензий на декарбонизацию АПС

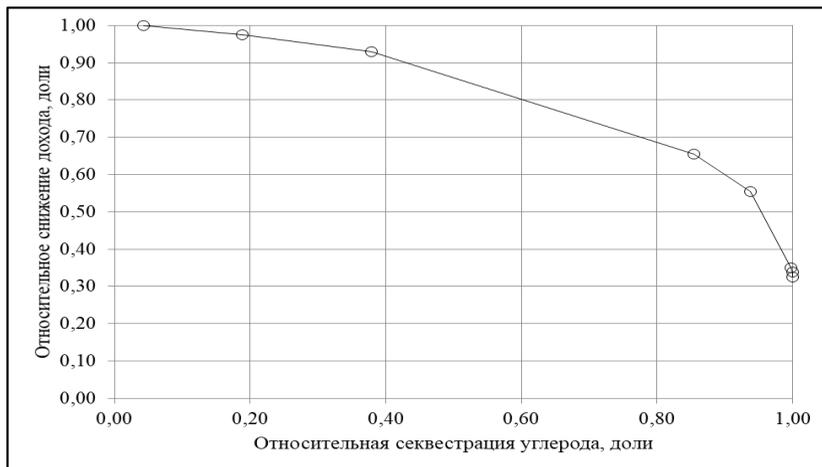
При сохранении списка возделываемых культур рост планируемых объемов секвестрации углерода сопровождается потерей доходности растениеводства (таблица 24).

Таблица 24 – Показатели низко углеродной трансформации растениеводческих отраслей Белгородской области при возрастающих значениях весового коэффициента

Весовой коэффициент при секвестрации углерода	0	5	10	20	50	100	200	500
Валовой доход, млрд. руб.	25,2	25,19	25,14	23,62	21,54	9,54	4,74	1,08
Прирост секвестрации углерода, тыс. т CO ₂ -экв.	193,2	201,6	207,4	329	389	552,6	579,3	594,3

Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

Проведенный численный эксперимент позволяет установить характер этой связи (рисунок 9). Очевидная ее нелинейность дает возможность добиться существенных объемов декарбонизации при относительно небольших потерях доходности растениеводства: 10%-е потери доходности эквивалентны 40%-ному уменьшению ЭПГ.



Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

Рисунок 9 – Связь падения доходности растениеводства с ростом объемов секвестрации углерода. Белгородская область, значения показателей нормированы.

Разнообразие производственных структур растениеводства в регионах приводит к вариациям параметров обсуждаемой зависимости. В таблице 25 даны оценки изменений доходностей и объемов секвестрации углерода для восьми регионов (по одному из каждого федерального округа).

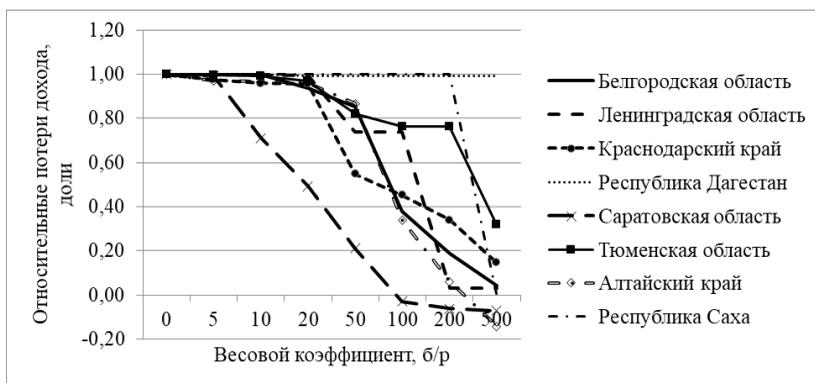
Таблица 25 – Аккумуляция углерода и падение доходности при «жесткой» стратегии декарбонизации растениеводства

Регионы	Изменение доходности	Прирост секвестрации углерода
Белгородская область	-95,68%	67,49%
Ленинградская область	-96,83%	131,29%
Краснодарский край	-85,25%	66,28%
Республика Дагестан	-0,58%	47,78%
Саратовская область	-107,18%	160,28%
Тюменская область	-68,04%	78,76%
Алтайский край	-114,27%	65,12%
Республика Саха	-99,27%	89,57%

Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

Особенности региональных стратегий декарбонизации растениеводства в региональных АПС более отчетливо видны на нижеследующем рисунке 10. Обращает на себя внимание разная чувствительность секторов по производству растениеводческой продукции на нагрузку, связанную с декарбонизацией. Так в Саратовской области небольшая нагрузка (весовой коэффициент >5) уже приводит к довольно резкому снижению доходности. Противоположные примеры – Республики Дагестан и Саха (Якутия). АПС этих регионов практически не чувствительны к мерам по снижению ЭПГ. Однако в большинстве региональных АПС заметное падение доходностей начинается с ростом весового коэффициента

после 20 единиц. В первом приближении эти эффекты можно объяснить особенностями исходной структуры площадей. В той же Саратовской области на долю подсолнечника и кукурузы приходится более 60% посевных площадей. Стратегии декарбонизации предполагают существенное снижение их доли с заменой зерновыми, что и приводит к падению доходности. Напротив, мало специализированная структура посевных площадей (как, например, в Дагестане) препятствует падению доходности, но и не приводит к существенной секвестрации углерода.



Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

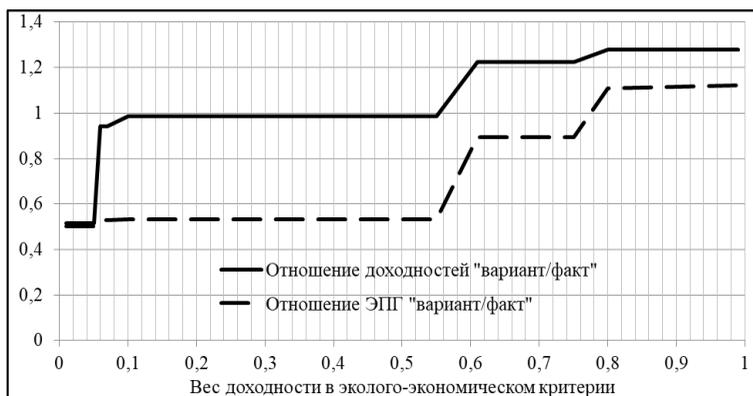
Рисунок 10 – Потери валового дохода от возделывания сельскохозяйственных культур в восьми регионах России.

Учет особенностей в откликах региональных АПС на те или иные карбоновые нагрузки дает возможность обосновать элементы аграрной политики в части стимулирования выполнения Стратегии низко углеродного развития. Формально на федеральном уровне речь идет о решении задачи оптимального распределения карбоновых нагрузок на региональные АПС по критерию максимизации накопления углерода при условии не ухудшения параметров Продовольственной безопасности (например, картофель и овощи) и ограничениях на потери

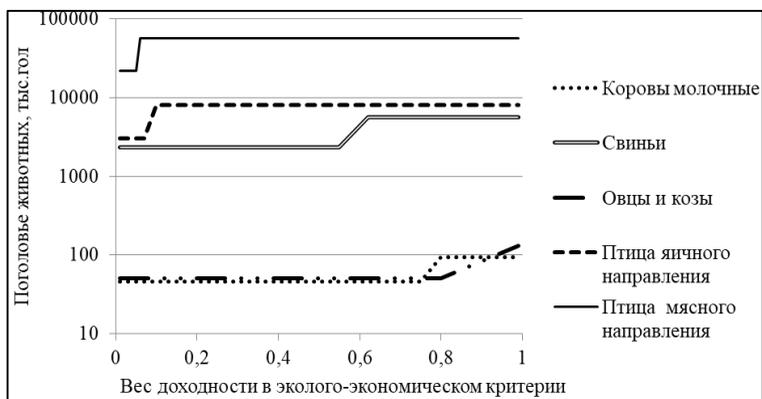
доходностей. Задача по-прежнему остается мультикритериальной. Решение должно удовлетворять бюджетному ограничению, то есть объему средств господдержки на компенсацию потерь доходностей АПС регионов.

Похожим образом анализируются особенности стратегий декарбонизации в отраслях животноводства, производственная структура которых вынуждена адаптироваться к нагрузкам по декарбонизации. Решается следующая задача: максимизируется линейная комбинация выручки от реализации продукции животноводства и ЭПГ, сопровождающих это производство. На приросты поголовья сельскохозяйственных животных в конце стратегического прогнозного интервала времени наложены двухсторонние ограничения. На следующем рисунке 11 показаны зависимости относительных величин (доходностей и ЭПГ по отношению к факту) от веса доходности в линейной комбинации двух критериев. Как видим, зависимости характеристик от весового коэффициента имеют вид ступенчатых функций. При этом относительные потери доходности в случае «жесткой» стратегии декарбонизации составляют около 50% по сравнению с фактом. При $\alpha = 0,05$ происходит переключение в режим, соответствующий единичному отношению доходностей «вариант» к факту. Далее, на интервале $0,55 \leq \alpha \leq 0,62$ происходит переключение отраслевой структуры животноводства, сопровождающееся ростом доходности в сочетании с приростом ЭПГ, который, однако, не приводит к росту эмиссии сверх фактических значений. При $\alpha \geq 0,78$ ЭПГ становится равной фактическому значению и превышает этот уровень с дальнейшим ростом весового коэффициента. Такая картина

формируется из-за изменений поголовья, что можно наблюдать на рисунке 12.



Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]
 Рисунок 11 – Белгородская область. Зависимость относительных доходностей и ЭПГ от весового коэффициента.



Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]
 Рисунок 12 – Белгородская область. Зависимость поголовья животных от стратегии декарбонизации.

Последовательность переключения поголовья по отраслям, происходящая скачкообразно, что является следствием линейности

экономико-математической модели, соответствует вкладам сельскохозяйственных животных в общую ЭПГ животноводства. Таким образом, прирост доходов происходит вначале за счет отраслей птицеводства, затем свиноводства и в последнюю очередь молочного скотоводства и овцеводства. На рисунке 13 показана зависимость производства относительно факта животноводческой продукции трех видов. Сопоставляя эти графики с рисунком 5 можно выделить достаточно узкий диапазон вариации весового коэффициента $0,62 \leq \alpha \leq 0,80$, в котором прирост производства мясной продукции сопровождается снижением ее углеродного следа. При этом отрасль молочного скотоводства таким свойством не обладает.



Источник: Расчеты авторов с помощью системы «Декарбон СХ» [28]

Рисунок 13 – Зависимость производства животноводческой продукции от веса доходности в эколого-экономическом критерии.

Выводы. Полученные оценки устойчивы и не зависят от производственной структуры животноводства региональных АПС.

Процедура оптимизации структуры землепользования в данном случае представляет собой задачу линейного программирования в следующей постановке. Требуется минимизировать ЭПГ в конце стратегического интервала прогноза при сохранении общей площади земель сельскохозяйственного назначения при двухсторонних ограничениях на все категории: пашню, пастбища и сенокосы, многолетние насаждения, залежи и лесные массивы (в пределах земель сельскохозяйственного назначения). Для всех земельных категорий определены удельные доходности и удельные ЭПГ. Последний показатель для пашни определен с учетом решения задачи оптимизации отраслевой структуры растениеводства. Анализ устойчивости полученного оптимального решения содержится в соответствующем отчете, генерируемом Solver Excel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методология проектирования эффективных и устойчивых региональных АПС с низким углеродным следом, включая научно обоснованные эколого-экономические и социальные критерии для оценки эффективности и устойчивости АПС регионов, модельный инструментарий, алгоритмы и методики расчетов, базы данных и основанную на них информационно-аналитическую систему. При разработке методологии были учтены методы исследования процессов низко углеродного развития социально-экономических систем, как в России, так и в зарубежных странах, изучены математические модели и методы, применяемые за рубежом, для разработки и анализа политики низко углеродного развития.

Полученные результаты, представленные в данной работе, могут быть использованы при разработке и анализе стратегий низко углеродной трансформации АПС регионов, а также для оценки эффективности элементов агропродовольственной политики, механизмы которой ориентированы, в том числе, на снижение углеродного следа продукции сельского хозяйства. Применение данной методологии проектирования и средства программной поддержки позволит существенно усилить обоснованность стратегических решений по развитию региональных АПС в условиях изменений климата, снизить неблагоприятные экономические эффекты от потерь сельскохозяйственной продукции. К практическим результатам разработки следует отнести возможность получения рациональных решений по землепользованию на землях сельскохозяйственного назначения, в частности создание управляемых лесных массивов, играющих важную роль в связывании углерода и получении товарной продукции от лесного хозяйства.

Информационно-аналитическая система «ДЕКАРБОН_СХ», предназначена для вычисления и сценарного анализа параметров региональной АПС в процессе выбора стратегии их низко углеродной трансформации с учетом критериев эффективности и устойчивости. Стратегии определяются в результате решения ряда задач с использованием оптимизационных экономико-математических моделей с комплексными критериями, комбинирующими эколого-экономические и социально-экономические характеристики низко углеродной трансформации АПС регионов. Разработаны сценарии для анализа стратегий развития АПС в среднесрочном периоде. «Инерционный» сценарий предполагает инерционное поведение товаропроизводителей и моделируется экстраполяцией экстенсивных (площади, поголовье) и интенсивных (урожайности, продуктивности) переменных, а также сохранение тенденций изменения климатических характеристик на современном уровне по климатическому сценарию RCP8.5. «Целевой» сценарий предполагает достижение целевых показателей по снижению углеродного следа при производстве продукции сельского хозяйства. При этом климатические характеристики соответствуют адаптационному климатическому сценарию RCP4.5. Комплексный анализ полученных результатов показал возможности оценки влияния процесса низко углеродной трансформации региональных АПС на следующие показатели: валовой доход от сельскохозяйственной деятельности, региональный баланс органического вещества почв в процессе землепользования, объём ЭПП от растениеводства и животноводства, а также на изменения важных социальных индикаторов, таких как степень обеспеченности продовольствием населения регионов в соответствии с медицинскими

нормами здорового питания за счет собственного производства с точки зрения продовольственной безопасности России.

Разработанная информационно-аналитическая система может применяться для обоснования региональных планов адаптации сельского хозяйства к климатическим изменениям, включая оценку стратегий снижения углеродного следа продукции растениеводства и животноводства, повышения плодородия почв за счет рациональной структуры землепользования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Coase R. H. The problem of social cost //The journal of Law and Economics. – 2013. – Т. 56. – №. 4. – С. 837-877.
2. De Cara S., Thomas A. Projections d'émissions/absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020, Rapport final pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche //Thiverval-Grignon: UMR Economie publique. – 2008.
3. Lengers B., Britz W. The choice of emission indicators in environmental policy design: an analysis of GHG abatement in different dairy farms based on a bio-economic model approach //Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement. – 2012. – Т. 93. – С. 117-144.
4. Golub A. et al. The opportunity cost of land use and the global potential for greenhouse gas mitigation in agriculture and forestry //Resource and Energy Economics. – 2009. – Т. 31. – №. 4. – С. 299-319.
5. Pérez Domínguez I., Britz W., Holm-Müller K. Trading schemes for greenhouse gas emissions from European agriculture: A comparative analysis based on different implementation options //Revue d'Études en Agriculture et Environnement. – 2009. – Т. 90. – №. 3. – С. 287-308.
6. De Cara S. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre? //Cycle de conférences " Défi climat 2013": Politiques agricoles et forestières et climat. – 2013.
7. De Cara S., Vermont B. Émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole: coûts et potentiels d'atténuation, instruments de régulation et efficacité. – 2014. – №. hal-01173040.
8. Vermont B., De Cara S. How costly is mitigation of non-CO2 greenhouse gas emissions from agriculture?: A meta-analysis //Ecological Economics. – 2010. – Т. 69. – №. 7. – С. 1373-1386.

9. Ren M. et al. Enhanced food system efficiency is the key to China's 2060 carbon neutrality target // Nature food. – 2023. – Т. 4. – №. 7. – С. 552-564.

10. Zhao H. et al. China's future food demand and its implications for trade and environment // Nature Sustainability. – 2021. – Т. 4. – №. 12. – С. 1042-1051.

11. Рябов, И. Ю. Моделирование динамики землепользования на основе модели частичного равновесия GLOBIOM: задача разработки регионального модуля / И. Ю. Рябов, Е. В. Понькина, М. А. Карменова // МАК: Математики - Алтайскому краю. – 2021. – № 3. – С. 158-162. – EDN GMOYWV.

12. Романенко, И. А. Методы экономической оценки стратегий устойчивого развития агропродовольственных систем - зарубежный опыт / И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // Научные труды ВЭО России. – 2023. – Т. 240, № 2. – С. 257-280. – DOI 10.38197/2072-2060-2023-240-2-257-280. – EDN TSQAEM.

13. Jayet P. A. et al. The European agro-economic model AROPAj. – 2023. – №. hal-04109872.

14. Shcherbak I., Millar N., Robertson G.P. Global metaanalysis of nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen // PNAS. 2014. June 24. V. 111. № 25. P. 9199–9204.

15. Кудеяров, В. Н. Эмиссионный фактор закиси азота при применении азотных удобрений в земледелии России // Агрохимия. – 2021. – № 11. – С. 3-15. – EDN: NVKEFT.

16. Сиптиц, С.О. Концепция теоретической модели низкоуглеродной трансформации региональных агропродовольственных систем / С.О. Сиптиц // АПК: экономика, управление. – 2022. – № 11. – С. 10-19. / DOI: 10.33305/2211-10. – EDN: QICTEC.

17. Биологическая полноценность кормов / Н. Г. Григорьев, Н. П. Волков, Е. С. Воробьев [и др.]. – Москва : Агропромиздат, 1989. – 287 с. – ISBN 5-10-000693-5. – EDN YMMUUB.

18. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов, МГЭИК, 2006. Т. 4: Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования [сайт]. - URL: https://www.un-gsp.org/sites/default/files/documentos/ghg_booklet_russian_final.pdf. (дата обращения 5.09.2023).

19. Малышева Н.В. и др. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчета годичного депонирования углерода // ISSU 2542-1468. Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2017. – Т. 21. – № 1. – С. 4-13. / DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-4-13. – EDN: YKSNBX

20. Вайс А.А. Современные научные исследования в области лесовозобновления и образования насаждений // Исследования в области естественных наук. 2015. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://science.snauka.ru/2015/02/9062> (дата обращения: 24.08.2023). – EDN: TNHNGL.

21. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко, С. Нильсон, Ю.И. Булуй. – 2-е изд., доп. – Москва : ФАЛХ МСХ РФ, 2008. – 886 с. – EDN: FQDWDK.

22. Кулик, К. Н. Лесная мелиорация пастбищ засушливой зоны РФ и пути повышения ее эффективности / К. Н. Кулик, А. С. Манаенков, Б. Ж. Есмагулова // Известия Нижневолжского АУК: Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 3(63). – С. 30-40. – DOI 10.32786/2071-9485-2021-03-02. – EDN XEAAVZ.

23.Разработать методологию низко углеродной трансформации региональных агропродовольственных систем с учетом критериев их социо-эколого-экономической эффективности и устойчивости в процессе адаптации к климатическим изменениям: отчет о НИР ВИАПИ № 1021060207512-9-4.5.1. / С.О. Сиптиц, И.А. Романенко и др. - Москва, 2022. - 195 с. – EDN OKEYYK.

24.Сиптиц С.О., Романенко И.А. и др. Проведение научных исследований по разработке долгосрочных прогнозов развития внутренних и внешних рынков основных видов сельскохозяйственных товаров на базе международной модели AGLINK-COSIMO (в рамках сотрудничества с ОЭСР): отчет о НИР: гос. контракт № 1395-А/13 от 26.06.09 - Москва: ВИАПИ, 2009. - 195 с. - EDN: VMMTXR

25.Соболев, О. С Цены на агропродовольственную продукцию в 2004 году // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2004. – № 7. – С. 50-51. – EDN PBYOAF.

26.Разработка информационной технологии стратегического планирования агропродовольственных систем с учетом климатического фактора: отчет о НИР №121031700111-0. / С.О. Сиптиц и др. - Москва, ВИАПИ, 2021. - 137 с. - EDN ZYSEPM.

27.Егорова, О. Совершенствование управления устойчивостью и эффективностью сельского хозяйства региона // Современные проблемы садоводства и виноградарства и инновационные подходы к их решению. – Махачкала, 2016. – С. 273-278. – EDN XVVXJR.

28.Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024682052 РФ. «Программа ДЕКАРБОН_СХ»: № 2024680567 : заявл. 05.09.2024 : опубл. 17.09.2024 / В. М. Костусяк, С. О. Сиптиц, И. А. Романенко ; заявитель ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ. – EDN NPSIAT.

29.Сиптиц, С. О. Оценка и прогноз эколого-экономического состояния животноводства в регионах Российской Федерации / С. О. Сиптиц, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // Экономика сельского хозяйства России. – 2024. – № 7. – С. 122-129. – EDN OLZKFH.

30.МЭРТ: стратегию низко углеродного развития пересмотрят с учетом санкций // Ведомости. 19.02.23, 13:17. - Раздел «Экономика»: офиц. сайт. – URL: <https://www.vedomosti.ru/economics/news/2023/02/19/963543-minekonomrazvitiya> (дата обращения: 26.06.2024).

31.Минэкономразвития России: климатическая политика должна быть экономически эффективной // МЭРТ РФ. 7 июня 2024 17:10. - Раздел «Новости»: URL: https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_rossii_klimaticheskaya_politika_dolzha_byt_e_konomicheski_effektivnoy.html (дата обращения: 26.06.2024).

32.Сиптиц, С. О. Моделирование эффективных стратегических решений по низкоуглеродной трансформации отраслей животноводства / С. О. Сиптиц, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // АПК: экономика, управление. – 2024. – № 5. – С. 98-107. – DOI 10.33305/245-98. – EDN VJCZAW.

33.Сиптиц, С. О. Эколого-экономические аспекты совершенствования технологических способов выращивания и откорма крупного рогатого скота / С.О. Сиптиц, И.А. Романенко, Н.Е. Евдокимова // АПК: экономика, управление. – 2024. – № 7. – С. 29-36. – DOI 10.33305/247-29. – EDN IBEOJH.

34.МГЭИК. 2006. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. –URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html>

35.Распоряжение Минприроды России от 16.04.2015 г. № 15-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению

добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах РФ». Консультант Плюс. [Электронный ресурс] - URL: www.consultant.ru - 716 с. (дата обращения: 25.04.2024).

36. Сиптиц, С. О. Экономическая доступность продовольствия как критерий оценки устойчивости агропродовольственных систем в процессе низкоуглеродной трансформации / С.О. Сиптиц, И.А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2024. №8. С.14-22. – EDN BNDVOF.

37. Декларация всемирного саммита по продовольственной безопасности / Всемирный саммит по продовольственной безопасности, Рим, WSFS 2009/2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.fao.org (дата обращения 10.06.2024).

38. The 11th Global Food Security Index shows a deterioration in the global food environment for the third year, threatening food security // Economist Impact. Global Food Security Index, 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://impact.economist.com/sustainability/project/food-security-index/#key-findings> (дата обращения: 06.06.2024).

39. Доктрина продовольственной безопасности РФ (Указ Президента РФ 21.01.20, №20). - М.: «Росинформагротех», 2020. - 23с.

40. Сиптиц, С. О. Моделирование эффективных стратегических решений по низкоуглеродной трансформации отраслей животноводства / С. О. Сиптиц, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // АПК: экономика, управление. – 2024. – № 5. – С. 98-107. – DOI 10.33305/245-98. – EDN BJCZAW.

41. 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. – ISBN 978-5-6043464-4-0. – EDN LROAKD.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о регистрации программного средства «Декарбон_СХ»
и ее функциональные возможности. Иллюстративный материал.

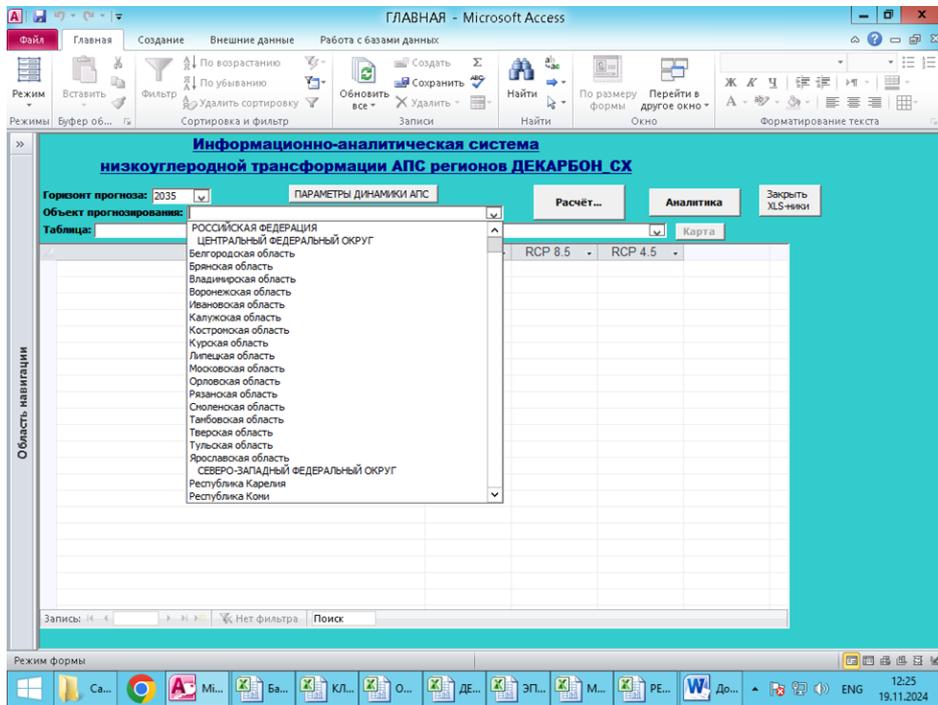


Рисунок А1 – Выбор региона для анализа и прогноза

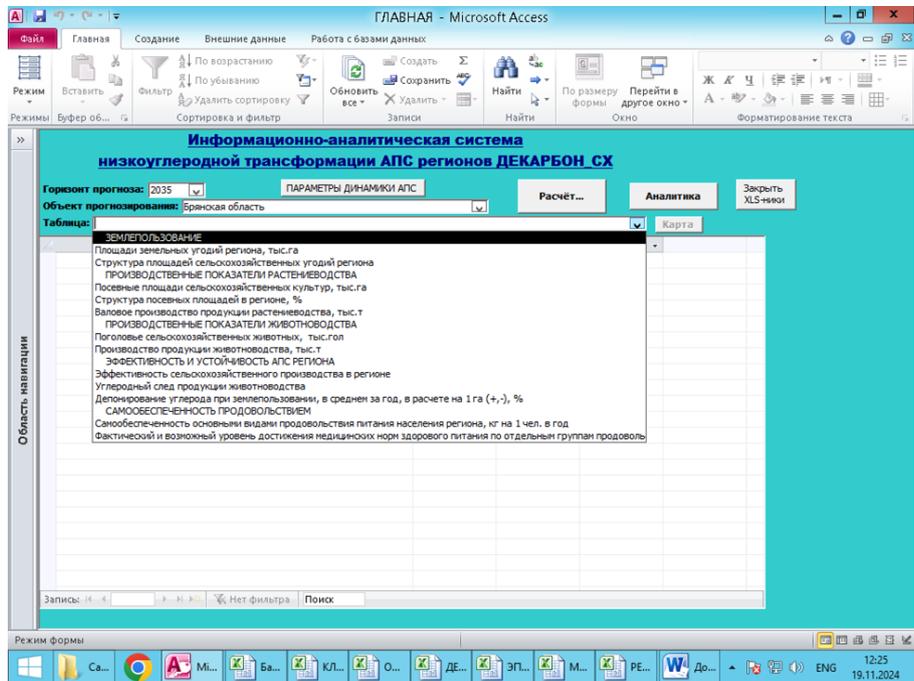


Рисунок А2 – Выбор показателя для расчета

ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИКИ АПС - Microsoft Access

Режим таблицы

Параметры	Минимум	Максимум	Выбор
Предельные темпы трансформации, доли/10 лет			
Пашня	0,1	0,5	0,3
Пастбища и сенокосы	0,1	0,5	0,3
Многолетники	0,1	0,5	0,3
Залежи	0,1	0,5	0,3
Лесные массивы	0,1	0,5	0,4
Темпы роста потенциальной урожайности и продуктивности, д			
Зерновые культуры	0	0,3	0
Технические культуры	0	0,3	0
Темпы роста объемов внесения минеральных удобрений, дол			
Объем NPK в действующем веществе	0	0,3	0,3
Темпы роста продуктивностей в животноводстве, доли/10 лет			
Выход мяса КРС	0	0,3	0
Выход мяса свиней	0	0,3	0
Выход мяса овец	0	0,3	0
Выход мяса птицы	0	0,3	0
Надоя молока	0	0,5	0,25
Яйценоскость	0	0,3	0
Коэффициент предпочтения стратегии декарбонизации			
Значение коэффициента	0	100	1
Допустимые темпы изменения площадей по категориям земель			
Пашня	0	0,5	0,3
Пастбища и сенокосы	0	0,5	0,3
Многолетние насаждения	0	0,5	0,3
Залежь	0	0,5	0,3
Лес	0	0,5	0,4
Критерий оптимизации землепользования			
*			

Режим таблицы

Рисунок А3 – Определение параметров оптимизационных расчетов

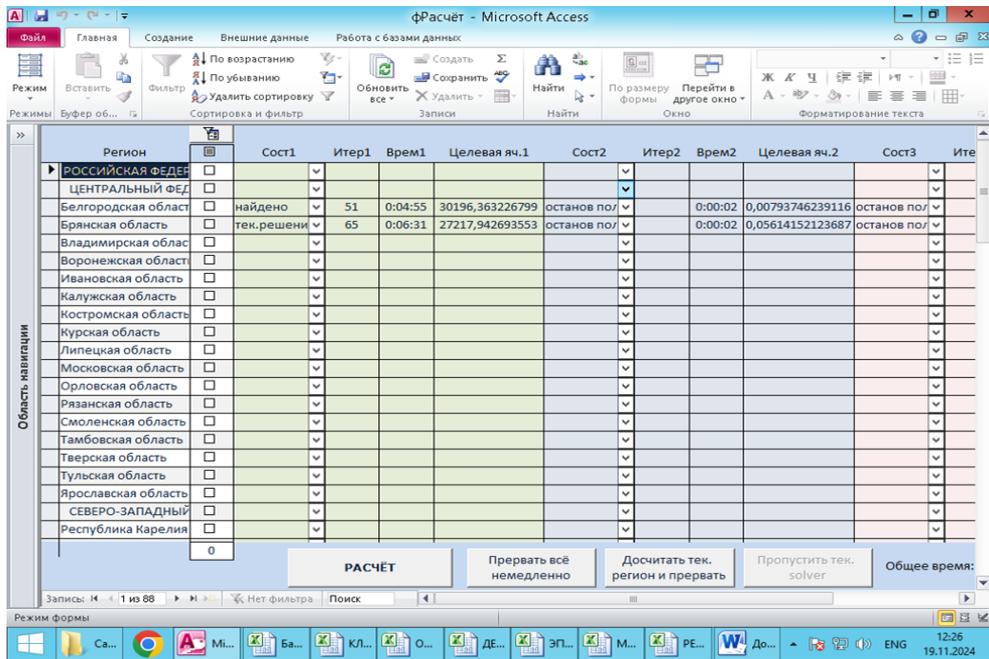


Рисунок А4 – Экран процесса оптимизационных расчетов

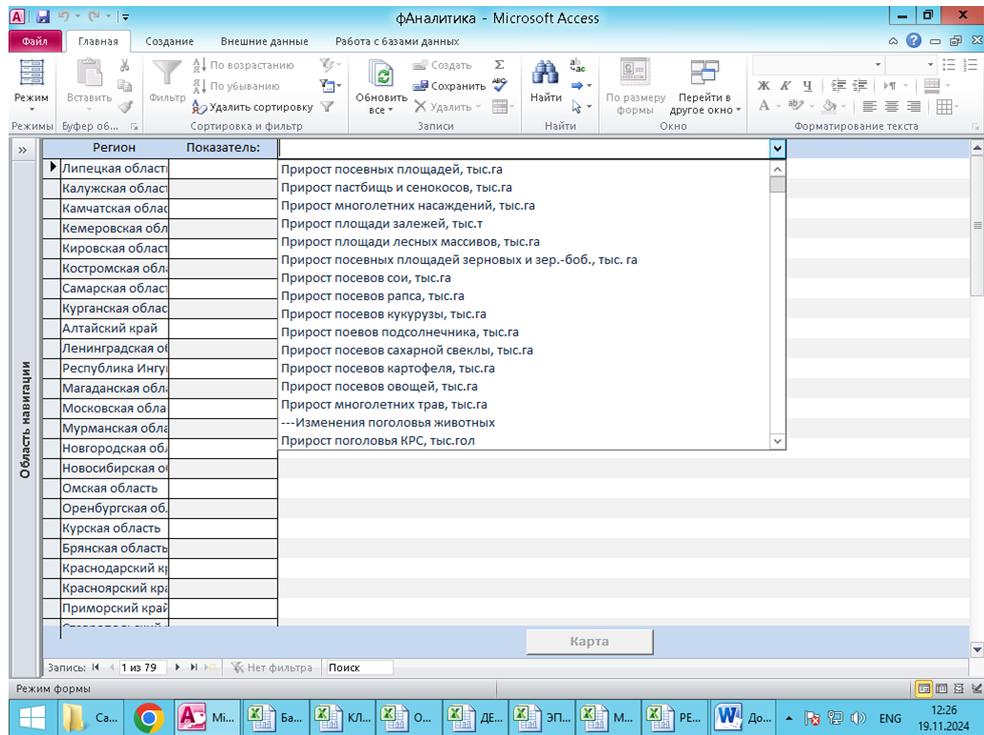


Рисунок А5 – Выбор выходных аналитических таблиц

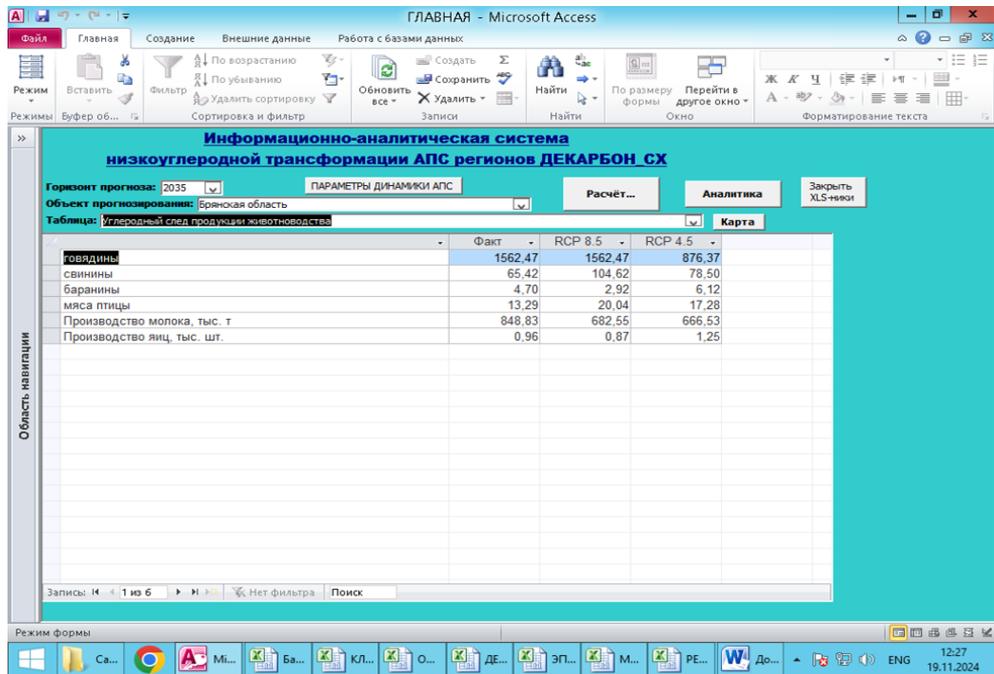


Рисунок А6 – Выходная таблица для одного региона

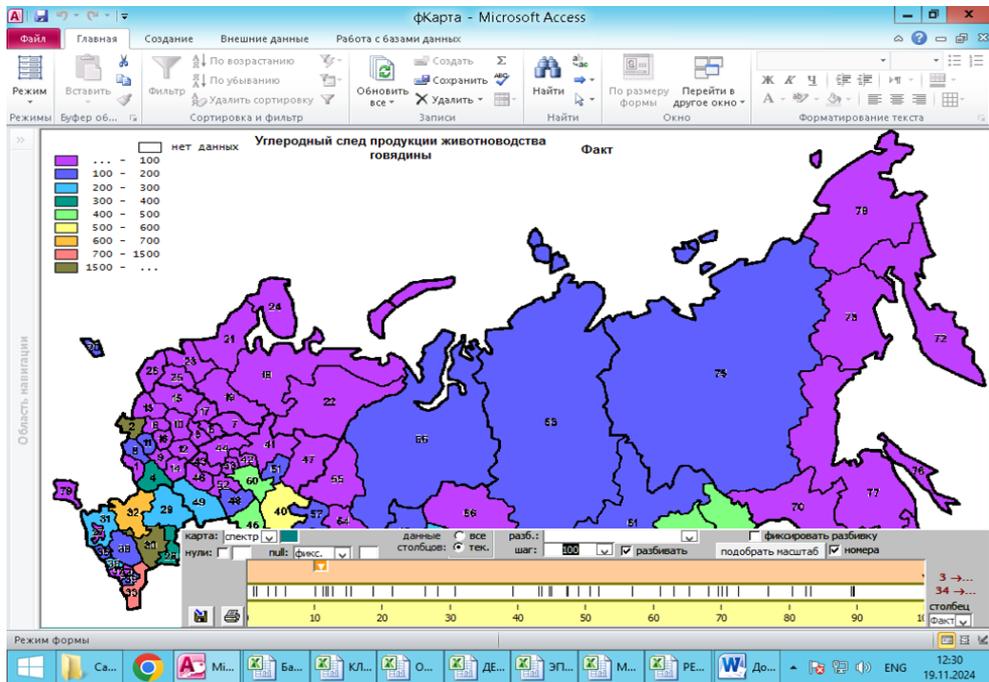


Рисунок А7 – Пример картографического представления полученных результатов для сценария «Базовый»

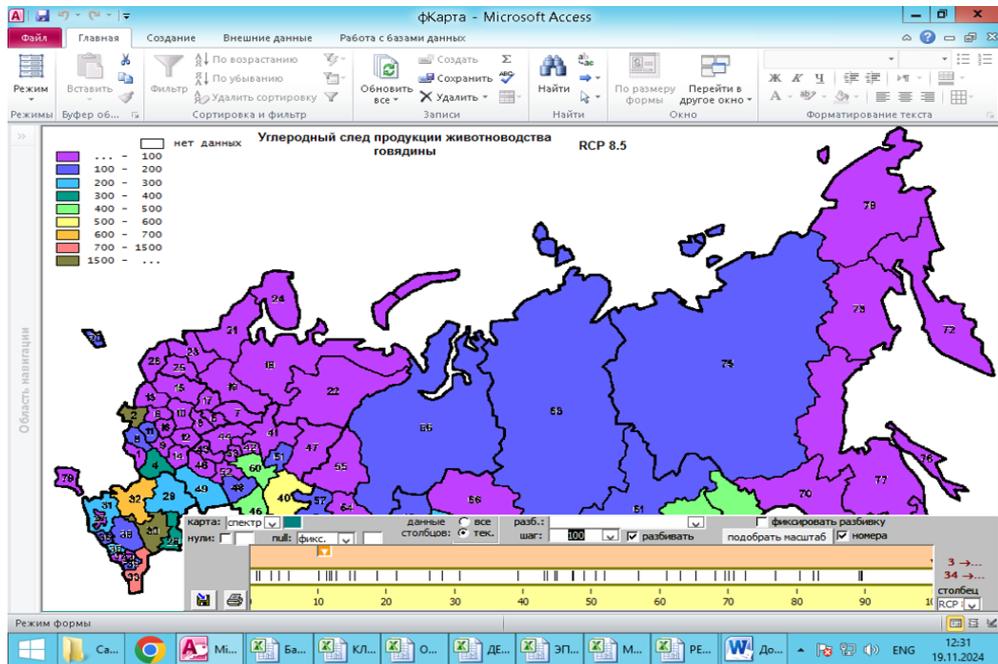


Рисунок А8 – Пример картографического представления полученных результатов для сценария «Инерционный»

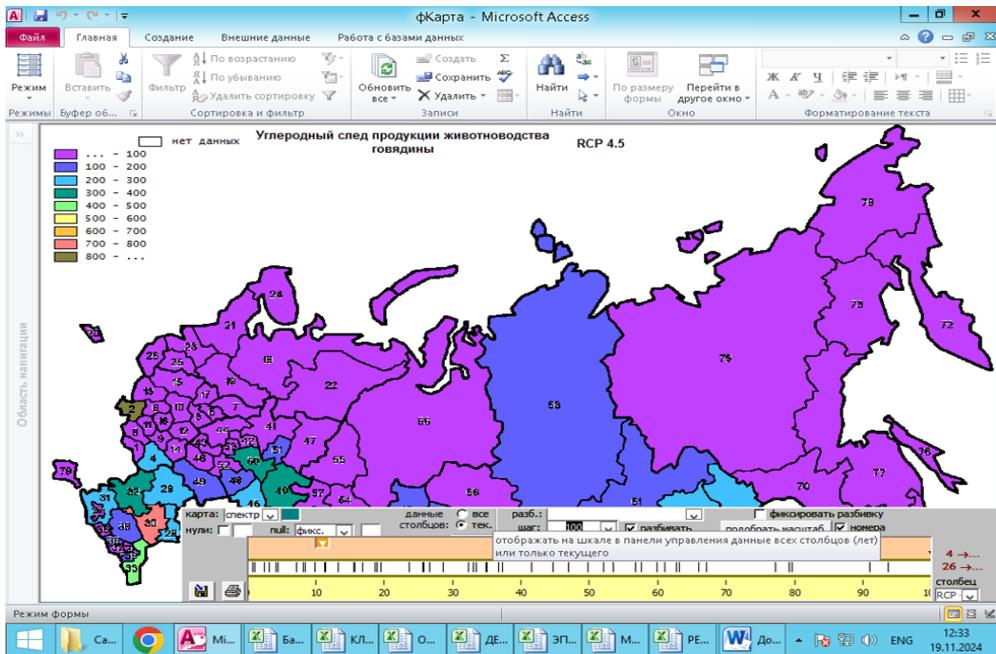


Рисунок А9 – Пример картографического представления полученных результатов для сценария «Целевой»



Рисунок А10 – Свидетельство о регистрации программного средства
«Декарбон_СХ»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Нормативы выбросов парниковых газов в животноводстве, кг на
голову в год. Таблица.

Регионы	Средне-годовая температура воздуха	Выбросы энтеральных газов				Выбросы CH ₄ из навоза					Среднегодовое выделение N ₂ O				
		Коровы	Шлейф	Свиньи	Овцы	Молочные коровы	Остальной КРС	Свиньи	Овцы	Куры-не-сушки	Коровы	Шлейф	Свиньи	Овцы	Птица
Алтайский край	0,65	89	52	1,3	8	7,68	6,01	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Амурская область	-3,71	67	42	1,3	8	5,64	5,55	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Архангельская область	-0,02	117	54	1,3	8	7,37	5,94	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Астраханская область	8,75	114	79	1,3	8	11,48	6,88	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Белгородская область	6,36	142	59	1,3	8	10,36	6,62	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Брянская область	5,05	108	57	1,3	8	9,74	6,48	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Владимирская область	3,93	147	57	1,3	8	9,22	6,36	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Волгоградская область	6,92	88	56	1,3	8	10,62	6,68	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Вологодская область	2,15	122	51	1,3	8	8,39	6,17	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Воронежская область	5,55	116	51	1,3	8	9,98	6,54	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Еврейская АО	0,65	134	72	1,3	8	7,68	6,01	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Забайкальский край	-4,54	96	59	1,3	8	5,25	5,46	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Ивановская область	3,16	128	48	1,3	8	8,86	6,28	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Иркутская область	-3,82	63	45	1,3	8	5,59	5,53	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Кабардино-Балкарская Республика	9,13	124	60	1,3	8	11,65	6,92	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Калининградская область	7,07	154	64	1,3	8	10,69	6,70	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Калужская область	4,38	130	56	1,3	8	9,43	6,41	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Камчатская область	-0,91	145	85	1,3	8	6,95	5,85	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Карачаево-Черкесская Республика	8,88	95	43	1,3	8	11,54	6,89	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60

Регионы	Средне-годовая температура воздуха	Выбросы энтеральных газов				Выбросы CH ₄ из навоза					Среднегодовое выделение N ₂ O				
		Коровы	Шлейф	Свиньи	Овцы	Молочные коровы	Остальной КРС	Свиньи	Овцы	Куры-не-сушки	Коровы	Шлейф	Свиньи	Овцы	Птица
Кемеровская область	-0,21	139	73	1,3	8	7,28	5,92	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Кировская область	1,68	142	56	1,3	8	8,16	6,12	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Костромская область	2,50	114	50	1,3	8	8,55	6,21	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Краснодарский край	11,26	151	64	1,3	8	12,65	7,15	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Красноярский край	-5,90	116	67	1,3	8	4,61	5,31	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Курганская область	1,52	130	68	1,3	8	8,09	6,11	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Курская область	5,51	108	55	1,3	8	9,96	6,53	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Ленинградская область	3,58	147	60	1,3	8	9,06	6,33	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Липецкая область	5,10	107	59	1,3	8	9,77	6,49	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Магаданская область	-8,92	88	49	1,3	8	3,20	4,99	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Московская область	3,94	174	67	1,3	8	9,22	6,37	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Мурманская область	-0,60	129	45	1,3	8	7,10	5,88	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Нижегородская область	3,56	136	57	1,3	8	9,04	6,32	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Новгородская область	3,92	125	60	1,3	8	9,21	6,36	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Новосибирская область	0,01	126	62	1,3	8	7,38	5,94	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Омская область	0,26	141	66	1,3	8	7,50	5,97	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Оренбургская область	3,80	79	48	1,3	8	9,16	6,35	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Орловская область	4,91	111	56	1,3	8	9,68	6,47	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Пензенская область	4,12	111	65	1,3	8	9,31	6,38	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Пермская область	0,65	131	60	1,3	8	7,68	6,01	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Приморский край	2,89	96	59	1,3	8	8,73	6,25	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60

Регионы	Средне-годовая температура воздуха	Выбросы энтеральных газов				Выбросы CH ₄ из навоза					Среднегодовое выделение N ₂ O				
		Коровы	Шлейф	Свиньи	Овцы	Молочные коровы	Остальной КРС	Свиньи	Овцы	Куры-не-сушки	Коровы	Шлейф	Свиньи	Овцы	Птица
Псковская область	4,73	124	56	1,3	8	9,59	6,45	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Адыгея	10,88	65	51	1,3	8	12,47	7,11	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Алтай	0,65	77	52	1,3	8	7,68	6,01	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Башкортостан	1,76	81	43	1,3	8	8,20	6,13	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Бурятия	-3,00	48	39	1,3	8	5,97	5,62	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Дагестан	11,76	54	66	1,3	8	12,89	7,20	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Ингушетия	10,56	135	79	1,3	8	12,32	7,07	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Калмыкия	8,93	40	48	1,3	8	11,56	6,90	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Карелия	1,72	115	47	1,3	8	8,18	6,13	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Коми	-2,03	122	72	1,3	8	6,42	5,73	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Крым	11,68			1,3	8	12,85	7,19	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Марий Эл	2,59	124	71	1,3	8	8,59	6,22	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Мордовия	3,85	116	52	1,3	8	9,18	6,36	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Саха (Якутия)	-11,10	96	63	1,3	8	2,17	4,75	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Северная Осетия-Алания	8,25	89	53	1,3	8	11,24	6,83	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Татарстан	2,68	142	66	1,3	8	8,63	6,23	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Тыва	-3,42	97	47	1,3	8	5,78	5,58	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Республика Хакасия	0,27	90	51	1,3	8	7,50	5,97	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Ростовская область	8,51	122	52	1,3	8	11,36	6,85	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Рязанская область	4,35	126	56	1,3	8	9,42	6,41	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60

Регионы	Средне-годовая температура воздуха	Выбросы энтеральных газов				Выбросы CH ₄ из навоза					Среднегодовое выделение N ₂ O				
		Коровы	Шлейф	Свиньи	Овцы	Молочные коровы	Остальной КРС	Свиньи	Овцы	Куры-не-сушки	Коровы	Шлейф	Свиньи	Овцы	Птица
Самарская область	4,18	134	73	1,3	8	9,34	6,39	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Саратовская область	5,53	84	49	1,3	8	9,97	6,54	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Сахалинская область	1,08	138	63	1,3	8	7,88	6,06	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Свердловская область	0,62	137	59	1,3	8	7,67	6,01	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Смоленская область	4,04	107	58	1,3	8	9,27	6,38	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Ставропольский край	9,05	145	60	1,3	8	11,62	6,91	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Тамбовская область	4,98	121	94	1,3	8	9,71	6,48	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Тверская область	3,66	120	56	1,3	8	9,09	6,34	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Томская область	-1,60	144	71	1,3	8	6,63	5,77	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Тульская область	3,81	115	58	1,3	8	9,16	6,35	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Тюменская область	-3,38	120	70	1,3	8	5,79	5,58	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Удмуртская Республика	1,96	118	49	1,3	8	8,29	6,15	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Ульяновская область	3,35	74	50	1,3	8	8,94	6,30	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Хабаровский край	-1,39	103	52	1,3	8	6,73	5,79	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Челябинская область	1,23	96	54	1,3	8	7,95	6,08	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Чеченская Республика	10,38	53	52	1,3	8	12,24	7,05	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Чувашская Республика	3,53	124	60	1,3	8	9,03	6,32	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Чукотский АО	-13,86	51	40	1,3	8	0,88	4,46	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60
Ярославская область	3,23	142	67	1,3	8	8,89	6,29	3	0,19	1,2	63,9	31,9	17,7	13,1	0,60

Научное издание

**Модели и сценарии низко углеродной трансформации
агропродовольственных систем регионов России**

Монография

Редактор: Л. Г. Муратова

ISBN 978-5-6052068-8-0

Формат 60x90/16

Объем 11 п. л.

Тираж 500 экз.

Типография ООО «Аналитик»

125171, Москва, ул. Клары Цеткин, д.18, корп. 3

Тел.: 8 (495) 617-09-24

<http://www.icolorit.ru>