

АДАПТАЦИЯ ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКОГО ПРОЕКТА К РЕГУЛИРОВАНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Д.И. Ковбашин¹, Н.М. Светлов², Н.М. Дронин³

^{1,3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии мира и геоэкологии*

² *Всероссийский институт аграрных проблем и информатики имени А.А. Никонова, филиал ФНЦ ВНИИЭСХ*

¹ *Аспирант; e-mail: kovbashin_daniil@mail.ru*

² *Проф., д-р экон. наук, чл.-корр. РАН; e-mail: svetlov@viapi.ru*

³ *Зав. лабораторией, канд. геогр. наук; e-mail: ndrionin@gmail.com*

С использованием авторского методического подхода проведен модельный анализ адаптации земельного проекта к регулированию выбросов парниковых газов с сельскохозяйственных угодий на примере хозяйств юга России. Учтены выбросы, обусловленные как технологическими, так и экосистемными процессами. Методы исследования операций и имитационного моделирования применены к изучению двух вариантов регулирования эмиссии парниковых газов – за счет рыночных механизмов с ориентацией на стоимость карбоновых единиц в ЕС и путем административного контроля, при котором устанавливаются предельные уровни эмиссии. Для каждого из вариантов определены оптимальные уровни интенсивности использования каждого из земельных участков, вовлеченных в проект. Разработанная методика дополняет научно-методическое обеспечение анализа земельных проектов, охватывающих большие территории, применительно к условиям государственного регулирования влияния хозяйственной деятельности на климат планеты. Она применима к проектам, отличающимся значительным пространственным разбросом участков. В результате проведенного исследования уточнены научные положения о влиянии климатической политики на технологический облик производства сельскохозяйственной продукции: выявлен значительный запас устойчивости земледелия в условиях юга России к рыночным методам регулирования выбросов парниковых газов; показано, что по мере ужесточения ограничительных мер климатической политики наилучшим решением чаще всего оказывается прекращение продуктивного использования участков с наибольшим потенциалом продуктивности при сохранении максимальной интенсивности производства на остальных. Совокупность полученных результатов рекомендуется к применению в практике разработки и анализа инвестиционных земельных проектов, в том числе анализа проектных рисков, а также при совершенствовании государственной природоохранной и климатической политики в составе инструментария анализа ее последствий.

Ключевые слова: климатическая политика, адаптация землепользования, модель DNDC, растениеводство, сельскохозяйственный проект, Ставропольский край, Республика Калмыкия

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.3

ВВЕДЕНИЕ

Сельское хозяйство не является главным источником выбросов парниковых газов (ПГ) в России. Согласно национальному докладу секретариату Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН), суммарные выбросы ПГ от аграрного сектора Российской Федерации составили 116,64 млн т CO₂-экв, или 5,7% от общих выбросов ПГ в стране (2051,4 млн т), снизившись на 52,9% к уровню 1990 г. (247,5 млн т) [Национальный доклад..., 2022]. Большое снижение выбросов ПГ в аграрном секторе страны связано с сокращением поголовья сельскохозяйственных животных, посевных площадей и внесения минеральных удобрений. В целом поголовье скота сократилось почти в 2,4 раза, птицы – на 16,7% по

сравнению с уровнем 1990 г., и только в последние пять лет наметилась смена этого тренда. Площадь земель, используемых для нужд сельского хозяйства России, после 1990 г. уменьшилась на 40,3 млн га, или 30,4%, и этот тренд на сокращение посевных площадей продолжался вплоть до 2005–2006 гг., но и процесс восстановления посевных площадей нигде не имеет устойчивый характер [Нефедова, Мкртчян, 2017; Ковбашин, Дронин, 2023]. Внесение минеральных азотных удобрений снизилось на 54,9%, и этот тренд наблюдался также до 2005–2006 гг., когда наметился некоторый рост внесения минеральных азотных удобрений. Но общий объем выбросов ПГ от сельского хозяйства практически не изменился с 2000 г., когда он составлял 118,9 млн т CO₂-экв.

На международном уровне выдвигаются ряд инициатив, направленных на более активное управление выбросами ПГ с сельскохозяйственных угодий. Статьи 3.3 и 3.4 РКК ООН предусматривают, что при расчете баланса выбросов парниковых газов (ПГ) в стране будет учитываться дополнительное связывание углерода в почвах в результате реализации специальных мер в области управления землепользованием. На Парижской конференции по климату (COP 21) в 2015 г. была предложена программа добровольных действий «Инициатива 4 на 1000: почвы для продовольственной безопасности и климата», которая была призвана способствовать решению трехуровневой проблемы: продовольственной безопасности, адаптации аграрного сектора к изменению климата и смягчения последствий выбросов парниковых газов [Soussana et al., 2019]. Эта инициатива предусматривает увеличение фиксации углерода в почвах с помощью почвозащитных способов ведения сельского хозяйства. Глобальные модели показывают, что увеличение содержания органического углерода в обрабатываемых почвах на 4% в год позволит компенсировать все выбросы парниковых газов, связанные с сельским хозяйством, обеспечивая при этом поддержание плодородия почв [Minasny et al., 2019].

В связи с этой инициативой огромные площади российских сельскохозяйственных угодий, даже неиспользуемых, обещают стать важным конкурентным преимуществом страны. Потенциал консервации углерода в почвах сельхозугодий России имеет всемирное значение. В связи с этим актуально изучение вариантов климатической политики, направленных на сокращение эмиссии ПГ, а в контексте проактивного управления рисками агробизнеса – оценка возможностей адаптации землепользования к наиболее вероятным вариантам этой политики и ожидаемых последствий адаптационных мероприятий.

В данной работе проводится модельный анализ адаптации земельного проекта к регулированию выбросов ПГ с сельскохозяйственных угодий на примере хозяйств юга России. Изучается два варианта регулирования эмиссии ПГ – за счет рыночных механизмов с ориентацией на стоимость карбоновых единиц в ЕС и путем административного контроля, при котором устанавливаются уровни обязательного снижения эмиссии в течение года. В первом случае определяется, при какой стоимости на углеродные единицы у фермеров появляются экономические стимулы к переходу на менее интенсивные формы земледелия. Во втором – каков уровень снижения выбросов ПГ, при котором фермер еще сохраняет экономическую мотивацию к производству своей продукции в условиях снижения интенсивности использования земель.

Целью исследования является углубленный анализ инвестиционного земельного проекта, охватывающего земельные участки сельскохозяйственного назначения, расположенные в Ставропольском крае и Республике Калмыкия, общей площадью 30,6 тыс. га. Учитывая перспективы изменений в климатической политике как на федеральном, так и на региональном уровне, для принятия решения о судьбе проекта (осуществить; доработать; отклонить) необходимо понимание того, каким окажется облик бизнеса на вовлекаемых в проект земельных участках при тех или иных изменениях. Если изменения будут направлены на сокращение эмиссии парниковых газов по сравнению с уровнем, предусмотренным тем технологическим решением, которое заложено в проект его разработчиками, то на всех или некоторых участках придется вводить альтернативные технологические решения, а если это невозможно, то выводить из проекта некоторые или все участки.

Участки, вовлеченные в проект, распределены по трем массивам (рис.). Первый массив общей площадью 12 569 га находится в центральной части Буденновского района Ставропольского края. Поскольку главный фактор, лимитирующий урожайность в этом районе, – недостаток влаги, основной принцип проектирования агротехнологий в этой агроклиматической зоне – это сбережение влаги в почве. Озимая пшеница здесь выращивается после паров, и после ее уборки поле снова уходит под пар. Проектная урожайность в данном районе 5 т/га после пара. Второй массив находится севернее в Арзгирском районе Ставропольского края. Он занимает 12 163 га. Здесь озимая пшеница, согласно проекту, выращивается без использования пара, а ее средняя урожайность составит 3,5 т/га. Третий массив общей площадью 5900 га находится в Ики-Бурульском районе Калмыкии. Здесь озимая пшеница выращивается после паров, проектная урожайность составляет 2 т/га. Характеристики погодных условий на этих массивах, необходимые для расчета баланса ПГ, включают среднесуточные температуры и осадки по двум метеостанциям – Буденновска и Элисты [Специализированные..., 2023] за период 2010–2022 гг. Особенности, определяющие различия в выбросах ПГ, продиктованы технологией возделывания и характеристиками почв, в первую очередь различным содержанием гумуса по подтипам каштановых почв и долей глинистой фракции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенная оценка последствий регулирования выбросов ПГ для земельного проекта на территории Ставропольского края и Республики Калмыкия основывается на новой числовой эко-

номико-математической модели оптимального использования сельскохозяйственных угодий, относящейся по назначению к классу задач исследования операций, по используемому математическому аппарату – к классу задач целочисленного программирования, и на существующей имитационной модели эмиссии ПГ (модель DNDC), откалиброванной применительно к исследуемому объекту. Особенность модели оптимального землепользования, отличающая ее от моделей либо субмоделей опти-

мальной производственной структуры или производственной программы растениеводства [Математическое..., 1990; Применение математических..., 2020; Svetlov, 2020], состоит в том, что искомым в ней является не вектор посевных площадей, а отображение множества земельных участков на множество технологий землепользования (в частном случае – на множество агротехнологий). В этом отношении такая модель родственна задачам о назначении [Акоф, Сасиени, 1971].

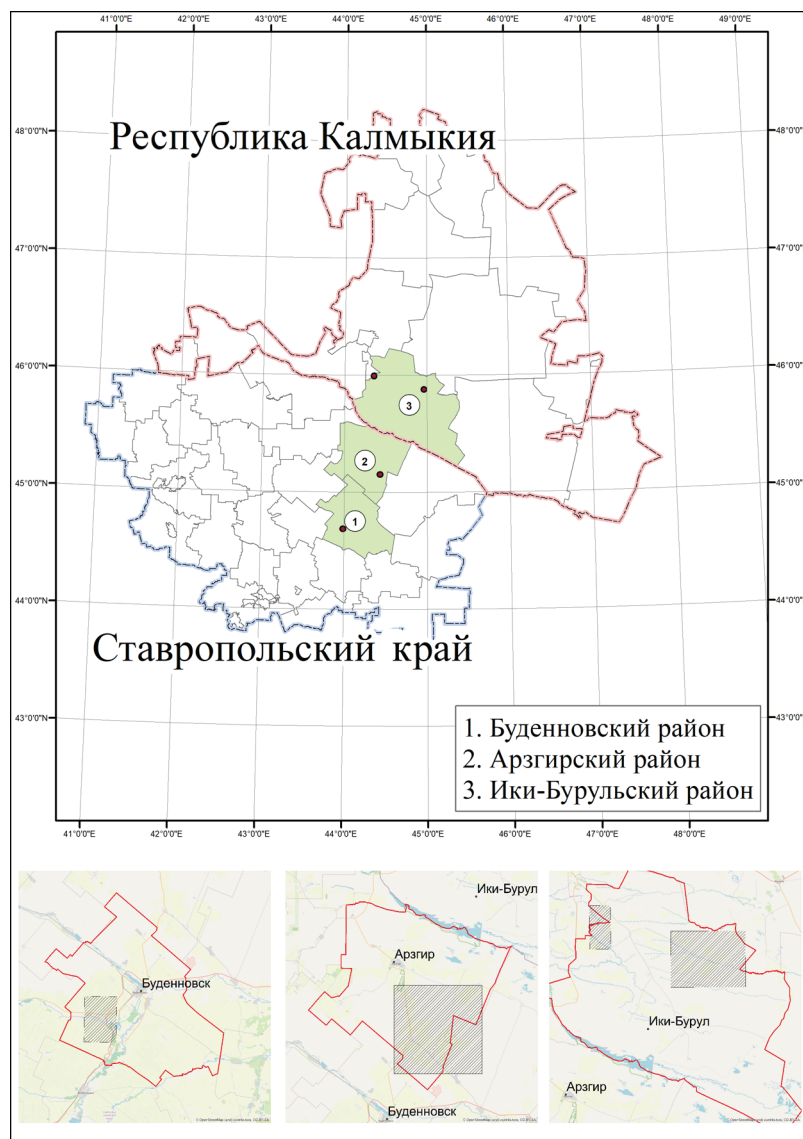


Рис. Расположение участков исследованного хозяйства

Fig. Location of plots of the studied farm

В экономико-математической задаче моделирования оптимального землепользования даны площади земельных участков; чистые приведенные стоимости операционного денежного потока (без учета платежей за эмиссию парниковых газов) и объемы эмиссии парниковых газов (в пересчете на

CO₂), порождаемой каждым участком при использовании каждой технологии из конечного дискретного множества доступных технологий; цена эмиссии парниковых газов (также в пересчете на CO₂); требования к минимальным и (или) максимальным площадям земельных участков, на которых ис-

пользуется та или иная технология; лимит эмиссии парниковых газов (в эквиваленте CO_2). Требуется отыскать распределение земельных участков между доступными технологиями, максимизирующее операционный денежный поток инвестиционного земельного проекта при следующих условиях:

- на каждом участке может использоваться только одна технология;
- суммарная площадь применения каждой технологии должна находиться в границах, установленных нормами государственного регулирования;
- суммарная эмиссия парниковых газов (в пересчете на CO_2) не должна превосходить объем, установленный государственным регулированием;
- суммарный дисконтированный операционный денежный поток проекта за период его жизненного цикла с учетом платежей за выброс парниковых газов по установленной цене должен достигать максимально возможного значения.

В зависимости от целей моделирования условия государственного регулирования и цена эмиссии парниковых газов, используемые при составлении числовой модели, могут быть фактическими, прогнозными или сценарными.

Вышеприведенной постановке соответствует задача целочисленного программирования, сформулированная ниже.

Множества: S – земельных участков, T – технологий.

Параметры: a_s – площадь земельного участка $s \in S$; f_{st} – чистая приведенная стоимость операционного денежного потока (без учета платежей за эмиссию парниковых газов), порождаемого участком $s \in S$ при использовании технологии $t \in T$; e_{st} – эмиссия парниковых газов (в эквиваленте CO_2) с участка $s \in S$ при использовании технологии $t \in T$; c – размер платы за единицу объема эмиссии парниковых газов (в эквиваленте CO_2); $\underline{m}_t$ и $\bar{m}_t$ – наименьшая и наибольшая площадь под технологией $t \in T$, разрешенная условиями государственного регулирования; b – максимальная эмиссия парниковых газов, допускаемая условиями государственного регулирования.

Переменные: $x_{st} \in \{0; 1\}$ – переменная, равная 1 в случае назначения технологии $t \in T$, на участок $s \in S$.

Уравнения и неравенства: $\sum_{t \in T} x_{st} = 1, s \in S$ – единственность технологии, применяемой на каждом участке; $\underline{m}_t \leq \sum_{s \in S} a_s x_{st} \leq \bar{m}_t, t \in T$ – соответствие площади, охваченной технологией t , условиям государственного регулирования (при отсутствии таковых выбираются значения $\underline{m}_t = 0, \bar{m}_t = \sum_{s \in S} a_s$); $\sum_{t \in T} e_{st} x_{st} \leq b$ – соответствие эмиссии парниковых газов требованиям государственного регулирования (при отсутствии таковых b принимается равным $\sum_{s \in S} (a_s \max_{t \in T} (e_{st}))$).

Целевая функция: $(\sum_{s \in S, t \in T} f_{st} x_{st}) - c \sum_{s \in S, t \in T} e_{st} x_{st} \rightarrow \max$.

Экономико-математическая модель, сформулированная выше, использована для анализа инвестиционного земельного проекта, о котором сказано во введении. Дисконтированная стоимость чистого операционного денежного потока проекта за время его жизненного цикла (15 лет) при норме дисконтирования 15% годовых составляет 4,698 млрд р. В части стоимостных показателей информационная база модели оптимального землепользования в приложении к этому объекту формируется с использованием модели денежных потоков (МДП) проекта, созданной его разработчиками. МДП рассчитывает стандартный набор показателей его эффекта и эффективности [Методические рекомендации..., 2004], включая приведенную стоимость чистого операционного денежного потока. Имеется возможность применить МДП для построения зависимости этого и других показателей от урожайности культур, производство которых предусмотрено проектом. В МДП отсутствует возможность выбора технологий для применения на каждом участке в отдельности и никак не учтена эмиссия парниковых газов. Исходные данные, необходимые для расчета ее годовых объемов за 2010–2020 гг. включительно, определены с помощью процессно-ориентированной имитационной модели DNDC (DeNitrification-DeComposition).

Данная модель рекомендуется Рамочной конвенцией ООН об изменении климата в качестве альтернативы методикам Межгосударственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО) также допускает использование этой модели для оценки эмиссии парниковых газов от сельского хозяйства. DNDC была апробирована для использования в России, а также настроена для корректного использования согласно исследованиям [Суховеева, 2018а, 2018б]. Расчеты производились в версии DNDC 9.5 [User's guide..., 2012].

Корректировки установленных параметров по умолчанию были проведены в соответствии с предложенными значениями в диссертации [Суховеева, 2018в]. Они касались параметров почвенного покрова, соотношений фракций биомассы сельскохозяйственных культур и требований сельскохозяйственных культур к внешним условиям.

Точные расчеты выбросов парниковых газов с участков возможны при наличии данных об урожайности на каждом из них. Такая статистика на участках, охваченных проектом, не собиралась, так как для этого нужна специализированная техника. В связи с этим принято допущение, согласно которому урожайность на участках, относящихся к одному и тому же массиву, одинакова, несмотря

на имеющиеся между ними различия в почвенном покрове. Еще одним ограничением является отсутствие информации о датах сева и уборки урожая по разным массивам. Поэтому данные параметры также приняты одинаковыми для всех участков.

Для целей моделирования землепользования мы вводим пять альтернативных технологий, отличающихся от проектной уровнями интенсивности использования участков (отношения среднегодовых валовых сборов каждой культуры к проектным валовым сборам приняты одинаковыми для всех культур, возделывание которых предусмотрено проектом). Для проектного сценария этот уровень равен 1, для альтернативных – 0,9; 0,75; 0,5; 0,249625; 0,01. Например, если уровень интенсивности равен 0,5, то в севообороте заданной площади площадь всех предусмотренных им культур сокращается вдвое, а высвобожденная площадь занимает либо сидеральными культурами, либо черным паром.

Поясним сделанный выбор. Главный фактор, лимитирующий урожайность полевых культур в этой зоне, – недостаток влаги, в связи с чем повышение интенсивности землепользования в сравнении с проектом чрезмерно капиталоемко (например, из-за затрат на содержание оросительных систем). Поэтому технологии, превосходящие по интенсивности существующую, в множество технологий, которые могут использоваться на участках, вовлеченных в проект, не включаются. Не включаются также технологии вывода земель из сельскохозяйственного оборота: например, предполагающие консервацию или заболачивание с целью захоронения углерода соответственно в почве или торфе, залесение с целью связывания атмосферного диоксида углерода в растительной биомассе лесного ценоза: их возможный положительный эффект проявится лишь за пределами длительности жизненного цикла проекта, а в его пределах их влияние на операционный денежный поток практически неотличимо от аналогичного влияния наименее интенсивной технологии. Значение интенсивности 0,249625, очень близкое к 0,25, представляет особый интерес в рамках проекта, поскольку оно обнулило бы приведенную стоимость операционного денежного потока, если бы соответствующая технология была распространена на все участки.

Основываясь на принятых решениях и доступных данных, мы определили параметры модели по следующим процедурам.

Рассчитали значения приведенной стоимости чистого операционного денежного потока для случаев, в которых какая-либо альтернативная технология занимает все участки проекта. Для этого использовали МДП, замещая в ней проектный выход продукции каждого вида с 1 га той же величиной,

умноженной на соответствующий уровень интенсивности.

Параметры f_{st} определили, распределив значения, рассчитанные на предыдущем шаге, по участкам пропорционально их проектной доле (известной) в выходе продукции полеводства.

Параметры e_{st} рассчитали условно, предположив, что наибольший фактически наблюдавшийся объем эмиссии парниковых газов за период, по которому имеются данные, соответствует проектному уровню интенсивности производства, а наименьший (в отдельных случаях он был отрицательным) – нулевой интенсивности (посевы сидератов). Для альтернативных технологий отсекали на этом интервале долю, равную соответствующему уровню интенсивности.

Параметры a_s известны из исходных данных. Значения остальных параметров определяются моделируемыми сценариями. Всего изучено 16 сценариев:

– девять сценариев ограничения объемов выбросов, в которых параметр b принимает значения от $0,9b_0$ до $0,1b_0$ с шагом $(-0,1b_0)$, где $b_0 = \sum_{s \in S} (a_s \max_{t \in T} (e_{st}))$. При этом $c = 0$, $\underline{m}_t = 0$, $\bar{m}_t = \sum_{s \in S} a_s$;

– семь сценариев платы за выбросы, в которых параметр принимает значения (в пересчете на рубль по курсу 84,91 р./евро) 800 и от 600 до 100 евро с шагом 100 евро, при этом $b = b_0$, $\underline{m}_t = 0$, $\bar{m}_t = \sum_{s \in S} a_s$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты эмиссии CO₂-экв. с исследуемых участков проводились для периода в 2010–2020 гг. в зависимости от типов почв, интенсивности производства (пар / не пар) и погодных условий (табл. 1). Наибольшие средние эмиссии CO₂ определены для посевов озимой пшеницы (без паров) на темно-каштановых мицелярно-карбонатных и каштановых мицелярно-карбонатных почвах на участках в Ставропольском крае – 4,95 и 4,52 т/га соответственно. Наименьшие – 0,79 т/га для посевов на бурых солонцеватых почвах и солонцах Калмыкии. Наибольшую эмиссию имеют участки с высокогумусированными почвами с тяжелым гранулометрическим составом. Секвестрация углерода в почве связана, главным образом, с илистой фракцией [Суховеева, 2018в]. Во время парования эмиссия ПГ значительно снижается, и в первые годы за счет паров происходит секвестрация углерода. Оставление под паром каждый год каштановых мицелярно-карбонатных почв на участках в Ставропольском крае снижает эмиссию ПГ посевов на 25%. При этом урожайность озимой пшеницы выше на 30%, чем на интенсивно (без пара) используемых участках. Снижение эмиссий CO₂ на 20% выявлено для посевов на светло-каштановых солонцеватых

и солончаковых почвах в засушливых условиях Калмыкии, но при меньшей урожайности (на 17%) озимой пшеницы по сравнению с участком в Ставропольском крае.

Сценарные расчеты на модели оптимального землепользования выполнены с использованием инструментального средства GAMS версии 30.2, поддерживающего алгоритм CBC [Coin-or/Cbc..., 2023] версии 2.10, предназначенный для решения линейных задач целочисленного программирова-

ния методом ветвей и границ в сочетании с проекционным методом [Деменков, 2016] отыскания оптимальных решений задач линейного программирования. Числовая модель содержит 1170 целочисленных переменных, две вспомогательных неограниченных переменных, 203 уравнения и неравенства. Время решения числовой модели (без учета времени на формирование числовой модели и на вывод результатов решения) составляло порядка сотых долей секунды.

Таблица 1

Объемы эмиссии CO₂ (экв. кг/га) за период 2010–2020 гг.

Тип почв	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2010–2020
5 т/га пар каждый год – Буденновский район Ставропольского края												
Каштановые мицелярно-карбонатные (каштановые глубокие)	3581	–307	4249	327	4627	468	4794	495	4888	477	4951	28 550
Пойменные засоленные	2042	–1513	2522	–914	3007	–719	3247	–626	3385	–572	3478	13 337
3,5 т/га без пара – Арзгирский район Ставропольского края												
Темно-каштановые мицелярно-карбонатные (темно-каштановые глубокие)	5221	3561	4567	4920	5068	5142	5176	5198	5210	5216	5221	54 500
Каштановые мицелярно-карбонатные (каштановые глубокие)	3707	1864	2935	3365	3563	3673	3738	3787	3821	3848	3873	38 174
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковые и солонцы (автоморфные)	4071	2347	3462	3891	4094	4192	4249	4288	4310	4324	4335	43 563
2 т/га пар каждый год – Ики-Бурульский район Республики Калмыкия												
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковые	3538	1087	3345	1210	3156	1121	3056	1054	2987	1010	2931	24 495
Бурые солонцеватые и солонцы (автоморфные)	748	–319	631	–91	765	–12	838	34	888	58	914	4454
Солонцы луговые (гидроморфные)	2057	259	1814	454	1816	461	1803	453	1783	447	1761	13 108

В табл. 2 приводятся расчеты снижения интенсивности использования участков при разных лимитах углеродного налога, проведенные с использованием модели оптимального землепользования. В целом модель показывает большую чувствительность рассматриваемого инвестиционного проекта к административному регулированию эмиссий ПГ. Уже при лимите 0,9, чтобы обеспечить требуемое снижение выбросов на 10% по сравнению с базовым периодом, целесообразно будет перевести в пар или под сидераты весь участок площадью 3716 га светло-каштановых солонцеватых и солончаковых почв в Калмыкии, но также и небольшой участок в 287 га наиболее плодородных темно-каштановых

почв в Ставропольском крае. При лимите выбросов 0,7 хозяйство будет вынуждено вывести из интенсивного оборота почти все участки (93%) с наиболее плодородными темно-каштановыми почвами в Ставропольской части хозяйства. Именно на этих участках окупаемость выбросов ПГ продукцией оказывается одной из наихудших – хуже только на светло-каштановых солонцеватых и солончаковых почвах Калмыкии. По крайней мере, так обстоит дело применительно к множеству технологий, заложенному в модель оптимального использования сельскохозяйственных угодий.

В модели рассмотрены пять альтернативных технологий, отличающихся от проектной уровня-

ми интенсивности использования участков – 0,9; 0,75; 0,5; 0,249625; 0,01 (интенсивность проектной технологии принята за единицу). Интенсивность технологии понимается как среднегодовой валовой выход товарной продукции (в пропорциях, предусмотренных проектом) с единицы площади севооборота за время его полной ротации. Изначально мы ожидали, что в случае введения лимитов на выброс ПГ на участках всех типов интенсивность их использования будет, как правило, снижаться пропорционально лимитам. Однако, как показывает модель, по мере усиления ограничений увеличивается доля участков с уровнем интенсивности 0,25 и 0, а другие промежуточные варианты интенсивности использования участков встречаются редко (табл. 3). Таким образом, часть участков будет использоваться максимально интенсивно (т. е. без паров или с сохранением их проектной доли к посевным площадям), а снижение объемов выбросов

будет достигаться за счет полного перевода значительной части земель в пар, в том числе самых плодородных участков. Данная закономерность наблюдается во всех районах (см. табл. 3). При введении больших лимитов в Ики-Бурульском районе Калмыкии участки с высокими объемами эмиссии полностью переводятся в пар. В Буденновском районе Ставропольского края, напротив, перевод в пар происходит только при самых жестких лимитах на эмиссию ПГ. В Арзгирском районе Ставропольского края при введении больших лимитов на эмиссию, увеличивается доля участков с низкой интенсивностью (0,25), а перевод части земель в пар начинается при лимитах 0,6 от базового варианта интенсивности. Таким образом, модель позволяет получить весьма разные условия реализации проектов при введении регулирования выбросов ПГ, но общим для них является малая вероятность промежуточных вариантов интенсивности ведения земледелия.

Таблица 2

Соотношение площади участков разных типов с максимально интенсивным использованием при различных лимитах на объем эмиссии парниковых газов

Лимиты выбросов ПГ, в долях к проектным	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Тип почв	Доля площади участков с максимально интенсивным использованием, %								
5 т/га пар каждый год – Буденновский район Ставропольского края									
Каштановые мицелярно-карбонатные	100	100	100	100	100	85	48	11	0
Пойменные засоленные	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3,5 т/га без пара – Арзгирский район Ставропольского края									
Темно-каштановые мицелярно-карбонатные	97	62	7	0	0	0	0	0	0
Каштановые мицелярно-карбонатные	100	100	100	100	62	0	0	0	0
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	100	100	100	100	0	0	0	0	0
2 т/га пар каждый год – Ики-Бурульский район Республики Калмыкия									
Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Бурые солонцеватые и солонцы (автоморфные)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Солонцы луговые (гидроморфные)	100	100	100	100	100	0	0	0	0

В модели исследовался и вариант введения рыночных механизмов регулирования эмиссии ПГ, когда эмитенты парниковых газов будут обязаны покупать углеродные единицы по рыночной цене. В отличие от административного регулирования выбросов ПГ, модель показывает слабую чувствительность проекта к введению рынка квот. В разных ценовых сценариях необходимость снижения эмиссии наблюдается только при ценах выше 300 евро за 1 т/экв. CO₂. При самых высоких исторических ценах в 120 евро за 1 т/экв. CO₂ на Европейском

рынке выбросов (EU ETS) приведенная стоимость операционного денежного потока сокращается почти на треть, но возможностей ее повысить путем снижения интенсивности производства и соответствующего сокращения выбросов не возникает: стоимость недополученной продукции оказывается больше, чем снижение издержек в связи с выбросами. Таким образом, проекты, подобные рассмотренному, не получают достаточных стимулов к пересмотру технологии в направлении сокращения выбросов ПГ даже при исторически наивысших ценах.

Таблица 3

Площадь использования земель с различной интенсивностью при заданных объемах эмиссии парниковых газов

Район	Объем эмиссии в долях от базового уровня	Интенсивность					
		1	0,9	0,75	0,5	0,25	0
Ики-Бурульский	0,9	2184	0	0	0	0	3716
	0,8	2184	0	0	0	0	3716
	0,7	2184	0	0	0	0	3716
	0,6	2184	0	0	0	0	3716
	0,5	2184	0	0	0	0	3716
	0,4	673	0	0	0	0	5227
	0,3	673	0	0	0	0	5227
	0,2	673	0	0	0	0	5227
	0,1	673	0	0	0	0	5227
Буденновский	0,9	12 569	0	0	0	0	0
	0,8	12 569	0	0	0	0	0
	0,7	12 569	0	0	0	0	0
	0,6	12 569	0	0	0	0	0
	0,5	12 569	0	0	0	0	0
	0,4	11 118	0	0	0	1452	0
	0,3	7453	0	0	0	5117	0
	0,2	3830	0	0	0	8739	0
	0,1	2768	0	0	0	1644	8157
Арзгирский	0,9	11 833	0	200	0	130	0
	0,8	8563	0	0	0	3600	0
	0,7	3234	0	0	5597	3332	0
	0,6	2604	0	0	0	6596	2963
	0,5	1132	0	0	0	697	10 334
	0,4	0	0	0	0	0	12 163
	0,3	0	0	0	0	0	12 163
	0,2	0	0	0	0	0	12 163
	0,1	0	0	0	0	0	12 163

ВЫВОДЫ

В данной работе оценивается с позиций возможного сокращения эмиссии ПГ проект использования земель в зерновом хозяйстве, который одобрен банком и осуществляется на участках, расположенных на трех полигонах – в двух районах Ставропольского края и в одном районе Республики Калмыкия. Цель моделирования – анализ гипотетической ситуации, в которой после освоения запланированных капитальных вложений вводятся в действие меры федеральной политики регулирования выбросов ПГ в земледелии. В таких условиях вопрос о целесообразности продолжения проекта будет зависеть от превышения входящих операционных денежных потоков над исходящими

при оптимальном распределении участков между различными вариантами сельскохозяйственных технологий. Моделирование показало, что рассматриваемый проект мог быть успешен и не потребовать снижения интенсивности производства в сравнении с запланированной в условиях рыночного регулирования выбросов ПГ. При введении административного регулирования с помощью лимитов выбросов ситуация становится неоднозначной, так как прогнозируется снижение интенсивности севооборотов, причем за счет вывода из интенсивного использования наиболее плодородных участков. Эта закономерность прослеживается на всех трех исследуемых полигонах, причем, чем больше на данном полигоне доля участков с высоким пло-

дородим, тем, соответственно, на большей доле площадей происходит снижение интенсивности севооборотов под влиянием регулирования.

Проведенное исследование внесло вклад в научно-методическое обеспечение анализа земельных проектов, охватывающих большие территории, в условиях предстоящих изменений в подходах и принципах государственного регулирования влияния хозяйственной деятельности на климат планеты. Методика, в частности, применима к проектам, отличающимся значительным пространственным разбросом участков. Она позволяет формировать и исследовать сценарии землепользования, совместимые с разными вариантами такой политики, а также давать сценарные оценки стоимости сценарных операционных денежных потоков, которые необходимы для анализа рисков инвестиционных проектов [Риск-менеджмент..., 2017, п. 6.3].

Еще один результат относится к сфере экономики сельского хозяйства: это значительные уточнения существующих представлений о климатической политике как факторе, определяющем технологический облик производства земледельческой продук-

ции. Первое из них, отмеченное выше, – большой запас устойчивости земледелия (по крайней мере, в условиях изученных полигонов) к рыночным методам регулирования выбросов ПГ. Второе (оказавшееся неожиданным для самих авторов) то, что по мере возрастающей жесткости ограничительных мер климатической политики наилучшим решением чаще оказывается прекращение продуктивного использования участков с наибольшим потенциалом продуктивности при сохранении максимальной интенсивности производства на остальных – вопреки интуиции, ошибочно предсказывавшей преобладание равномерного снижения интенсивности производства на большинстве участков или вывода в первую очередь самых непродуктивных участков. Напротив, при введении регулирования выбросов ПГ производство сосредоточивается преимущественно на участках, которые отнесены к числу сравнительно неблагоприятных для земледелия, поскольку снижение интенсивности размещенных здесь севооборотов привело бы к сравнительно малому эффекту сокращения выбросов, т. е. цели регулирования не были бы достигнуты.

Благодарности. Часть исследования, представленного в статье, выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-55-76005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций / пер. с англ. М.: Мир, 1971. 536 с.
- Деменков М. Проекционный алгоритм линейного программирования на основе поиска пересечения прямой и зонотопа / Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова. М., 2016. 195 с.
- Ковбашин Д.И., Дронин Н.М. Забрасывание пахотных угодий в европейской части России на фоне успехов сельского хозяйства в последние два десятилетия // Проблемы региональной экологии. 2023. № 2. С. 47–52. DOI: 10.24412/1728-323X-2023-2-47-52.
- Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. 3-е изд. / Институт системного анализа РАН, ЦЭМИ РАН; под ред. Н.Г. Алешинской. М., 2004. 221 с.
- Математическое моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве / А.М. Гатаулин и др. М.: Агропромиздат, 1990. 432 с.
- Нефедова Т.Г., Мкртчян Н.В. Миграция сельского населения и динамика сельскохозяйственной занятости населения в регионах России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 5. С. 58–67.
- Применение математических методов в управлении АПК Беларуси и России / Н.М. Светлов и др., М.: ЦЭМИ РАН, 2020. 177 с.
- Риск-менеджмент инвестиционного проекта. 2-е изд. / под ред. М.В. Грачевой. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2017. 663 с.
- Суховеева О.Э. Приложение модели DNDC к оценке параметров углеродного и азотного обмена в пахотных почвах Нечерноземья // Известия РАН. Серия географическая. 2018а. № 2. С. 74–85. DOI: 10.7868/S2587556618020073.
- Суховеева О.Э. Верификация модели DNDC для оценки параметров углеродного и азотного обмена в пахотных почвах Нечерноземья // Известия РАН. Серия географическая. 2018б. № 4. С. 89–95.
- Суховеева О.Э. Оценка пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ в агроландшафтах европейской территории России на основе имитационного моделирования: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2018в. 27 с.
- Электронные ресурсы**
- Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, нерегулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (дата обращения 15.05.2023).
- Специализированные массивы для климатических исследований: Информация ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения 14.05.2023).
- Coin-or/Cbc: COIN-OR Branch-and-Cut solver, Forrest J. et al. (eds.), URL: <https://zenodo.org/record/6522795> (access date 14.05.2023).
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B. et al. Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 2017, no. 292, p. 59–86, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706117300095> (access date 22.05.2023).

- Soussana J.-F., Lutfalla S., Ehrhardt F. et al.* Matching policy and science: Rationale for the “4 per 1000-soils for food security and climate” initiative, *Soil Tillage Research*, 2019, no. 188, URL: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010075246> (access date 22.05.2023).
- Svetlov N.* Decision-making on the use of arable land considering the factors of field crops yield, *E3S Web of Conferences*, International Scientific and Practical Conference “From Inertia to Develop: Research and Innovation Support to Agriculture” (IDSISA 2020), 2020, vol. 176, URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/36/e3sconf_idsisa2020_04003/e3sconf_idsisa2020_04003.html (access date 14.05.2023).
- User's guide for the DNDC model*, Version 9.5, USA, University of New Hampshire, Institute for the study of Earth, Oceans, and Space, 2012, URL: <https://www.dnrc.sr.unh.edu/model/GuideDNDC95.pdf> (access date 14.05.2023).

Поступила в редакцию 27.06.2023

После доработки 16.01.2024

Принята к публикации 14.02.2024

ADAPTATION OF AN AGRICULTURAL PROJECT TO THE REGULATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS

D.I. Kovbashin¹, N.M. Svetlov², N.M. Dronin³

^{1,3} *M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Physical Geography of the World and Geoecology*

² *A.A. Nikonova All-Russian Institute of Agrarian Problems and Informatics,
branch of the Federal Scientific Center VNIIESKh*

¹ *Ph.D. student; e-mail: kovbashin_daniil@mail.ru*

² *Prof., D.Sc. in Economics, corresponding member of RAS; e-mail: svetlov@viapi.ru*

³ *Head laboratory, Ph.D. in Geography; e-mail: ndronin@gmail.com*

Using an original methodological approach, a model analysis of the adaptation of an agricultural project to the regulation of greenhouse gas emissions from agricultural land was carried out for the farms in the south of Russia. Emissions from both technological and ecosystem processes were taken into account. Methods of operations research and simulation modeling are applied to the study of two options for regulating greenhouse gas emissions, i.e. through market mechanisms focusing on the cost of carbon units in the EU and through the administrative control, which sets the emission limits. For each of the options, the optimal intensity of use was estimated for each land plot involved in the project.

The proposed methodology supplements the scientific and methodological support for the analysis of the large-scale agricultural projects under the state regulation of the impact of economic activities on the Earth's climate. It is applicable to projects with a significant spatial dispersion of plots. As a result of the study, the scientific visions of the climate policy impact on the technological configuration of agricultural production were specified. A significant margin of sustainability of agriculture in the south of Russia to carbon market methods has been revealed; It is shown that as the restrictive administrative approaches are tightened, farmers prefer to stop the intensive use of areas with the highest productivity potential while maintaining the maximum production intensity within the rest. The totality of the results obtained is recommended for practical application for developing and analyzing investment agricultural projects, including the analysis of project risks, as well as for improving the state environmental and climate policy as a tool for analyzing its consequences.

Keywords: climate policy, land use adaptation, DNDC model, agricultural project, crop production, Stavropol Krai, Republic of Kalmykia

Acknowledgments. The study was partly financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 20-55-76005).

REFERENCES

- Ackoff R.L., Sasieni M.W. *Fundamentals of Operations Research*, John Wiley, New York, 1968.
- Demenkov M.E. *Proektsionnyi algoritm lineinogo programirovaniya na osnove poiska peresecheniya pryamoi i zonotopa* [A Projection-type Algorithm for Linear Programming Using Line and Zonotope Intersection], Institute of Control Sciences RAS, Moscow, 2016, 195 p.
- Matematicheskoe modelirovanie ekonomicheskikh protsessov v sel'skom khozyaistve* [Mathematical modelling of economic processes in agriculture], A.M. Gataulin et al. (avt.), Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 432 p. (In Russian)
- Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov*, 3rd ed. [Recommended Practice for

- Assessing Return on Investment Projects 3rd edition], N.G. Aleshinskaya (ed.), Institute for Systems Analysis of Russian Academy of Sciences, Central Economic Mathematical Institute Publ., 2004, 221 p. (In Russian).
- Primenenie matematicheskikh metodov v upravlenii APK Belarusi i Rossii: monografiya* [The use of mathematical methods in the management of agro-industrial complex in Belarus and Russia], N.M. Svetlov, V.I. Buts (eds.), Moscow, CEMI Russian Academy of Sciences, 2020, 177 p. (In Russian)
- Risk-menedzhment investitsionnogo proekta*, 2nd ed. [Risk management of an investment project], M.V. Gracheva (ed.), Moscow, UNITI-DANA Publ., 2017, 663 p. (In Russian)
- Sukhoveeva O.E. *Otsenka prostranstvenno-vremennoi izmenchivosti potokov CO₂ v agrolandshaftakh Evropeiskoi territorii Rossii na osnove imitatsionnogo modelirovaniya* [Evaluation of spatiotemporal variability of fluxes in agrolandscapes of the European Russia using simulation modelling], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 2018b, 27 p. (In Russian)
- Sukhoveeva O.E. *Prilozhenie modeli DNDC k otsenke parametrov uglerodnogo i azotnogo obmena v pahotnykh pochvah Nechernozem'ya* [Application of the DNDC model for estimation of carbon and nitrogen exchange parameters in arable soils in Non-Chernozem Zone], *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, 2018a, no. 2, p. 74–85, URL: 10.7868/S2587556618020073 (access date 14.05.2023). (In Russian)
- Sukhoveeva O.E. *Verifikatsiya modeli DNDC dlya otsenki parametrov uglerodnogo i azotnogo obmena v pahotnykh pochvah Nechernozem'ya* [Verification of the DNDC model for estimation of carbon and nitrogen exchange parameters in arable soils in Central Non-Chernozem zone], *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, 2018b, no. 4, p. 89–95. (In Russian)
- Web sources*
- Coin-or/Cbc: COIN-OR Branch-and-Cut solver*, J. Forrest et al. (ed.), URL: <https://zenodo.org/record/6522795> (access date 14.05.2023).
- Minasny B., Mcbratney A.B., Angers D. et al. Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, 2017, no. 292, p. 59–86, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706117300095> (access date 22.05.2023).
- Natsional'nyi doklad o kadastro antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990–2020 gg.* [National inventory report of anthropogenic emissions and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020], URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (access date 15.05.2023).
- Soussana J.-F., Lutfalla S., Ehrhardt F. et al. Matching policy and science: Rationale for the “4 per 1000-soils for food security and climate” initiative, *Soil Tillage Research*, 2019, no. 188, URL: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010075246> (access date 22.05.2023).
- Spetsializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy: Informatsiya VNIIGMI-MTsD* [Specialised arrays for climate research: Information from RIHMI-WDC], URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (access date 14.05.2023).
- Svetlov N. Decision-making on the use of arable land considering the factors of field crops yield. E3S Web of Conferences, *International Scientific and Practical Conference “From Inertia to Develop: Research and Innovation Support to Agriculture”* (IDSISA 2020), 2020, no. 176, URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/36/e3sconf_idsisa2020_04003/e3sconf_idsisa2020_04003.html (access date 14.05.2023).
- User's guide for the DNDC model*, Version 9.5, USA, University of New Hampshire, Institute for the study of Earth, Oceans, and Space, 2012, URL: <https://www.dndc.sr.unh.edu/model/GuideDNDC95.pdf> (access date 14.05.2023).

Received 27.06.2023

Revised 16.01.2024

Accepted 14.02.2024