

DOI 10.33952/2542-0720-2021-1-25-8-27

УДК 631.9+519.6

Баденко В. Л.<sup>1</sup>, Топаж А. Г.<sup>2</sup>, Медведев С. А.<sup>1</sup>, Захарова Е. Т.<sup>1</sup>

## МОДЕЛИ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

<sup>1</sup>ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»;

<sup>2</sup>ООО «Бюро Гиперборя»

**Реферат.** В настоящее время происходят серьёзные изменения в концепции проектирования систем земледелия. Они связаны с усилиями по устранению проблем, связанных с существующим разрывом между социально-экономическими требованиями к увеличению производства продукции сельского хозяйства и научным обоснованием устойчивого использования сельскохозяйственных земель. В статье представлены результаты решения этой проблемы на основе применения разработанной авторами интегрированной системы моделирования продукционного процесса сельскохозяйственных растений. Эта система была применена для анализа различных агротехнологий, в частности альтернативных стратегий планирования севооборотов в системах земледелия. Для этого использовали следующие инструменты, которые существуют в среде разработанной системы: 1) долгосрочный анализ возможного изменения плодородия сельскохозяйственных полей при применении разных агротехнологий; 2) обоснование выбранной схемы севооборота, включающей в себя различные агротехнологии и ресурсосберегающие мероприятия; 3) модельно-ориентированный подход к оценке сравнительной эффективности альтернативных стратегий землепользования. В первой части статьи представлены результаты, полученные с использованием этих инструментов по оценке альтернативных агротехнологий уборки урожая, связанных с оставлением или удалением растительных остатков с сельскохозяйственного поля, а также влияние этих агротехнологий на параметры плодородия почвы в долгосрочной перспективе. Результаты моделирования показывают, что оставление пожнивных остатков положительно влияет на динамику гумуса и содержание азота в метровом слое почвы. Во второй части статьи описаны результаты анализа сравнительной эффективности различных схем севооборота и таких сельскохозяйственных мероприятий, как внесение органических удобрений, использование зернобобовых и озимых промежуточных культур. Анализ позволил ранжировать эти мероприятия по эффективности влияния на сельскохозяйственное производство – самыми эффективными оказались внесение органических удобрений и использование в севообороте бобовых культур. Представленные результаты демонстрируют потенциальную востребованность предложенных методов и разработанной интегрированной системы моделирования продукционного процесса сельскохозяйственных растений для обоснования элементов систем земледелия и анализа их влияния на устойчивое развитие.

**Ключевые слова:** имитационная модель агроэкосистемы, севообороты, агротехнологии, устойчивость систем земледелия.

**Для цитирования:** Баденко В. Л., Топаж А. Г., Медведев С. А., Захарова Е. Т. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений для анализа элементов систем земледелия // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 1(25). С. 8–27. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-1-25-8-27.

**For citation:** Badenko V. L., Topazh A. G., Medvedev S. A., Zakharova E. T. Models of the production process of agricultural plants for the analysis of the elements of some farming systems // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 1(25). P. 8–27. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-1-25-8-27.

### Введение

Современный прогресс в разработке моделей роста и развития сельскохозяйственных культур привел к новому пониманию различных процессов, происходящих в системе «почва-растение-атмосфера», и их влияния на устойчивое земледелие [1–9]. Так, например, в ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (Агрофизический НИИ) уже более 30 лет разрабатывают и постоянно совершенствуют эколого-ориентированную динамическую модель AGROTOOL. Эта модель предназначена для оценки агрометеорологического состояния сельскохозяйственных культур, прогнозирования и анализа продукционного процесса растений с учетом различных агротехнических мероприятий, таких как орошение, сроки посева и сбора урожая, управление внесением удобрений и оценки воздействия на окружающую среду [8, 10, 11]. Модель AGROTOOL представляет собой универсальный инструмент прогнозирования роста и развития различных сельскохозяйственных культур, таких как ячмень, озимая и яровая пшеница, люцерна, кукуруза и другие [9, 12].

Устойчивое поддержание плодородия сельскохозяйственных ландшафтов при их активном использовании и соответствующие устойчивые системы земледелия – одна из широко обсуждаемых проблем аграрной науки [7, 13–16]. Актуальность данной проблемы в последнее время возросла в связи с существенными изменениями в использовании сельскохозяйственных земель во всем мире [17, 18]. Это связано, например, с организацией производства биодизеля, что требует научной поддержки для обоснования выбора сортов выращиваемых культур, схем севооборота, пространственного размещения культур и т. д., в том числе методами моделирования [19, 20]. При этом возникает проблема, связанная с преодолением противоречия между экономическими запросами общества и необходимостью обеспечения устойчивого развития агроландшафтов [7, 21]. Поэтому в последние годы сельскохозяйственная наука уделяет большое внимание экологической устойчивости агроландшафтов, а не достижению максимальной продуктивности (урожайности) или хозяйственной выгоды [1, 3, 5, 7–9, 13, 22–29].

Адекватное обоснование новых адаптивных ресурсосберегающих сельскохозяйственных технологий и систем земледелия требует перехода от широко используемых регрессионных (статистических) моделей к динамическим имитационным моделям агроэкосистем, основанным на математическом описании определяющих процессов в агроценозе [8, 30, 31]. Эта тенденция определяется тем, что имитационные модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур в настоящее время зарекомендовали себя как эффективный инструмент анализа и прогнозирования [32–35]. Основные преимущества динамических моделей сельскохозяйственных культур перед статическими статистическими моделями следующие: более широкий диапазон вариантов используемых данных об окружающей среде; повышение адекватности и точности результатов моделирования благодаря учету более широкого диапазона факторов и переменных состояния (фаза роста, биомасса, урожайность) агроэкосистемы, анализируемых при моделировании; получение результатов в соответствии с внешними переменными условиями (погодой) и снижение степени неопределенности результатов моделирования [7, 8, 12, 30, 36–38]. При этом динамическая модель сельскохозяйственных культур действительно может стать интеллектуальным ядром нового поколения систем поддержки принятия решений в сельском хозяйстве [32–34].

Вышеупомянутые преимущества динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур являются основанием для их широкого применения при анализе текущего и будущего состояний агроэкосистем и адекватного управления выращиванием продукции растениеводства в течение одного

вегетационного периода [39]. Однако использование моделей для долгосрочного планирования все еще находится в зачаточном состоянии [7, 40, 41]. В настоящее время благодаря прогрессу в развитии компьютерных и информационных технологий наиболее существенные технические ограничения преодолены, и использование моделей сельскохозяйственных культур становится важным фактором в среднесрочном и долгосрочном прогнозировании развития сельскохозяйственного производства [42–44]. При этом адекватное применение средств моделирования при таком прогнозировании требует адаптации таких моделей и соответствующего программного обеспечения для описания и управления изменениями параметров состояния агроэкосистемы при многолетнем севообороте [1, 7, 40, 45, 46]. Соответствующее решение должно удовлетворять следующим требованиям:

- универсальный характер алгоритма моделирования, например, структурная идентичность моделей для различных культур, климатических условий, почв и технологий выращивания;
- модель должна учитывать влияние культур-предшественников во всех существенных аспектах, таких как изменения агрохимических и агрофизических свойств при обработке почвы, симбиотическая фиксация азота бобовыми [47], разложение пожнивных остатков и т. д.;
- модель должна учитывать абиотические процессы в агроэкосистеме при перезимовке, такие как снегопад, промерзание почвы, таяние снега в межсезонье и т. д.;
- при моделировании необходимо оценивать не только урожайность, но и прогноз динамики экологических параметров устойчивости агроэкосистем, таких как баланс энергии и вещества в агроландшафте, включая выбросы парниковых газов; вынос питательных веществ и мелиорантов в грунтовые воды и за пределы агроландшафта; связывание углерода почвой; содержание гумуса (индексы плодородия) и т. п. [48].

Поэтому разработка экологически ориентированных комплексных моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур и специальных программных сред для учета севооборотов на основе циклической схемы расчета является актуальной задачей [8, 49, 50]. Реализация такой задачи дает возможность анализировать долгосрочные тренды показателей плодородия почв и других экологических параметров агроландшафтов. Приведенный выше список требований к системе принятия решений с моделями в качестве интеллектуального ядра для поддержки устойчивого сельского хозяйства не должен казаться избыточным. При этом известно несколько прототипов таких систем. Одним из примеров может служить модель DSSAT, которая является ведущим решением для моделирования продукционного процесса сельскохозяйственных культур в США [51–53]. DSSAT включает специальную опцию для анализа севооборота, который оценивает воздействие на окружающую среду и экономические риски с учетом использования удобрений, орошения, связывания углерода в почве, изменений климата и управления точным земледелием. Также хорошо известны несколько примеров успешного применения DSSAT для оптимизации сочетания анализа пожнивных остатков и севооборота [54], а также анализа нормы внесения азота для устойчивого растениеводства [55]. В Европейском Союзе одним из наиболее известных решений для анализа на основе моделей, включающих среднесрочное планирование в масштабе фермы, является LandCaRe-DSS, разработанное Центром агроландшафтных исследований имени Лейбница (Германия) [56].

**Цель исследований** – представление методов для среднесрочного и долгосрочного прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на основе имитационного моделирования продукционного процесса агроэкосистем. Предлагаемые универсальные решения образуют единую методологию анализа

различных вариантов использования сельскохозяйственных земель и основаны на развитии интегрированной программной среды для моделей сельскохозяйственных культур APEx (Automation of Polivariant EXperiments) [31, 57].

Для демонстрации практической значимости методов поставлены и решены две задачи. Первой задачей является оценка двух альтернативных методов уборки урожая, включающих удаление или оставление пожнивных остатков, и влияния этих альтернатив на основные показатели плодородия почвы. Вторая задача состоит в анализе сравнительной эффективности различных сельскохозяйственных мероприятий без учета негативного влияния возможных изменений климата в долгосрочных последствиях. Вместо чисто теоретического тематического исследования, описанного выше (одна культура, одна и та же реализация погоды и т. д.), представленный вычислительный эксперимент учитывает множество факторов, что позволяет рассматривать его как лучшее приближение к реальной ситуации.

### Материалы и методы исследований

#### Модель AGROTOOL

Алгоритм моделирования продукционного процесса сельскохозяйственных растений в AGROTOOL можно записать в виде следующего итерационного выражения [38]:

$$x(k+1) = f(x(k), a, w(k), u(k)), \quad x(0) = x_0, \quad k = 0, 1, \dots, T$$

где  $x$  – вектор динамических переменных состояния;  $a$  – вектор постоянных параметров;  $u$  – вектор контролируемых внешних воздействий (например, подкормки, поливы и т. д.);  $w$  – вектор неконтролируемых внешних воздействий (погода);  $k$  – временной шаг модели (временной шаг равен одному дню);  $f$  – эволюционный оператор (логическая сущность алгоритма моделирования);  $x_0$  – вектор начального состояния;  $T$  – последний шаг моделирования.

AGROTOOL представляет собой сложный комплекс подмоделей, описывающих процессы и явления, влияющие на рост и развитие одиночного растения в конкретном местоположении (точечная модель) [38]. Поскольку AGROTOOL является моделью третьего уровня продуктивности по классификации де Вита [58], то наличие воды и азота в почве оказываются основными лимитирующими факторами, снижающими потенциальную продуктивность, основанную на фотосинтезе.

В программном обеспечении AGROTOOL для моделирования культур есть несколько модулей, которые являются независимыми, масштабируемыми, заменяемыми, взаимодействующими на каждом временном шаге модели:

1. Агрометеорологический модуль. Этот модуль обеспечивает подключение к базе данных, содержащей сведения о суточных погодных характеристиках (влажность воздуха, минимальная и максимальная температура, солнечная радиация и количество осадков), которые необходимы для моделирования сельскохозяйственных культур.

2. Модуль радиации и фотосинтеза. Этот модуль обеспечивает вычисление суточной суммы солнечной радиации, перехватываемой и поглощаемой растениями, а также соответствующей суточной суммы первичных углеродных ассимилятов, которые накапливаются благодаря фотосинтезу и темновому метаболизму в течение временного шага модели.

3. Модуль турбулентного газообмена. Этот модуль обеспечивает расчеты профиля скорости ветра в посевах, а также соответствующего аэродинамического сопротивления для потоков тепла, водяного пара и двуокиси углерода.

4. Модуль динамики почвенных вод. Этот модуль обеспечивает расчеты баланса влажности почвы с использованием 10-слойного представления метрового профиля почвы. Баланс рассчитывается с учетом осадков, испарения воды из почвы, транспирации сельскохозяйственных культур, переноса воды в слоях почвы и



просачивания за пределы расчётного слоя (инфильтрация). В качестве входных данных алгоритм включает в себя основные гидрофизические константы почвы [38, 59].

5. Модуль роста и развития растений. Этот модуль включает набор специальных функций, связанных с «распределением роста», которые предназначены для оценки увеличения сухого вещества для различных частей сельскохозяйственных культур. Для определения сбалансированного роста побегов на всех стадиях вегетативного развития сельскохозяйственных культур разработана специальная концепция адаптивного распределения ресурсов роста в двухпоточной углеродно-азотной модели. «Физиологическое время», то есть биологический возраст растения, рассчитывается как сумма эффективных температур, этот параметр корректируется в соответствии с влиянием водного стресса растений [38].

6. Модуль переноса и трансформации азота в почве. Этот модуль предназначен для моделирования основных процессов, описывающих азотный статус почвы: аммонификации, гумификации подстилки, денитрификации/нитрификации, поглощения азота корнями, симбиотической фиксации азота бобовыми растениями [47].

7. Модуль управления агрономическими приёмами. Этот модуль обеспечивает модельное управление следующими операциями: посевом, предпосевным внесением азотных удобрений и подкормками «по листу», поливом, уборкой урожая. Все эти агрономические воздействия можно имитировать как в декларативном, так и в реактивном режимах. Это означает использование заранее определенных дат и темпов действий или формальных правил, основанных на обратной связи значений внутренних переменных модели, например, автоматический полив при падении влажности почвы ниже заданного критического предела [60].

#### ***Поливариантный анализ в АРЕХ***

АРЕХ (Automation of Polivariant EXperiments) – это интегрированная программная среда для моделей сельскохозяйственных культур, разработанная в Лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ. АРЕХ обеспечивает проектирование, выполнение и анализ многофакторных компьютерных экспериментов с использованием, в общем случае, произвольных имитационных моделей сельскохозяйственных культур [57]. АРЕХ можно использовать как универсальное хранилище внешних дескрипторов (описаний) динамических моделей культур, для чего предусмотрен специальный визуальный компонент, который позволяет пользователям регистрировать свои собственные модели. Также интерфейс АРЕХ включает удобный модуль для поливариантного анализа результатов моделирования. Внутри АРЕХ пользователь может разработать многомерное тематическое исследование (набор сценариев запуска), рассчитать модель в пакетном режиме и, наконец, провести расширенный статистический анализ полученных результатов. Модельный поливариантный анализ, или процедура компьютерного эксперимента, в АРЕХ базируется на трех основных понятиях: уровень фактора, сценарий и проект. Уровень фактора представляет собой набор из одной или нескольких таблиц, связанных с одним из предопределенных факторов. Сценарий представляет собой набор ссылок на уровни ключевых факторов, необходимых для одного прогона модели. Выделенными ключевыми факторами являются следующие: «почва», «культура», «местоположение», «исходное состояние», «технология» и «погода». Во время регистрации модели АРЕХ позволяет пользователям определять структуру переменных и параметров для конкретной модели и создавать список таблиц и их полей, а также массив метаданных. Проект содержит список сценариев и результатов их расчёта по модели (рисунок 1).

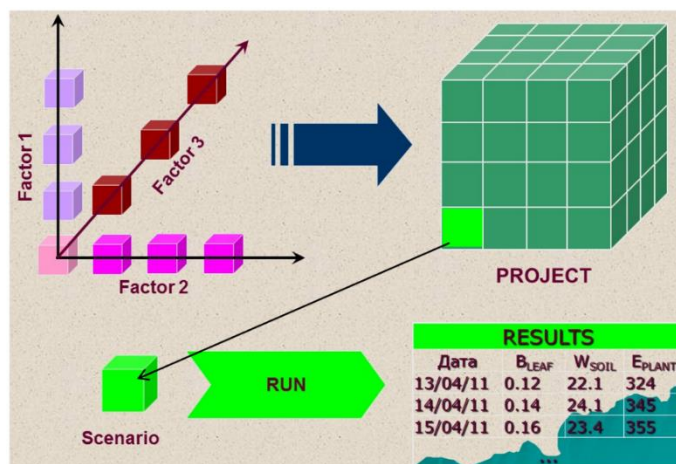


Рисунок 1 – Схема использования системы поливариантного анализа APEX для случая трех факторов

### *Долговременный анализ систем севооборота*

Сформулируем требования, которые должна удовлетворять динамическая модель продукционного процесса растений, чтобы ее можно было использовать для анализа севооборотов:

- адекватный уровень отклика модели к вариациям значений основных влияющих факторов (необходимо найти баланс между инерционностью, то есть грубостью модели и её чувствительностью);
- повышенное число выходных (отслеживаемых в ходе работы модели) характеристик, описывающих продуктивность, физиологию, экологию, плодородие и т. д.;
- управление факторами неопределенности модели;
- моделирование нескольких последовательных вегетационных периодов согласно выбранной схеме севооборота;
- модель должна описывать рост и развитие различных культур в рамках единого логического алгоритма, а также учитывать динамику агроэкосистемы в межвегетационный период (перезимовку).

Для анализа севооборотов в APEX были включены следующие дополнительные функции:

- механизм прямого задания последовательности выполнения внутри сценариев в проекте APEX и задания сценариев «граничных условий», определяющих начало новой ротации севооборота для конкретного сельскохозяйственного поля;
- настраиваемый интерфейс для передачи результатов предыдущего сценария в следующий сценарий в качестве начального состояния.

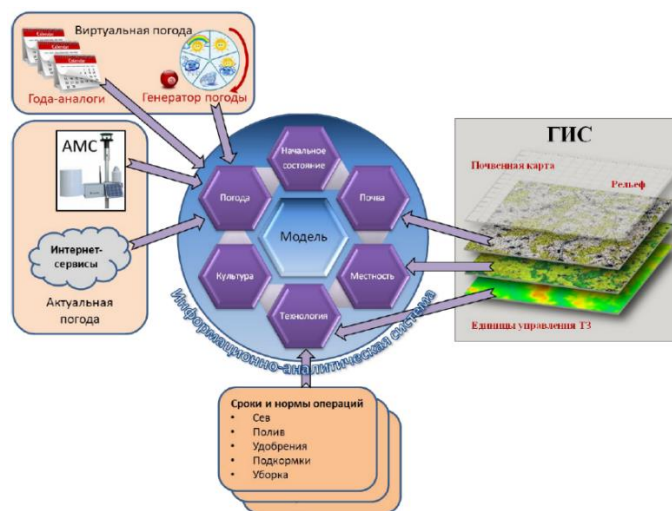
Основные особенности, которые оказались определяющими для успешного анализа севооборотов в среде APEX+AGROTOOL, следующие:

- для всех сельхозкультур, моделируемых в AGROTOOL, используется универсальный алгоритм;
- апробация AGROTOOL для различных сельхозкультур: зерновых (овес, озимая рожь, яровая и озимая пшеница, ячмень) бобовых, картофеля, кукурузы, корнеплодов, однолетних и многолетних кормовых трав;
- учет оставления/выноса пожнивных остатков в модуле углерод-азотного переноса и трансформации в почве;
- подмодель симбиотической азотфиксации у бобовых культур;

- учет перезимовки культур и процессов образования снежного покрова и снеготаяния;
- проверенная и реализованная интегрированная среда для многомерного анализа и автоматизации компьютерных экспериментов с моделями сельскохозяйственных культур;
- специальный программный модуль для планирования неполных факторных экспериментов и выполнения сложных последовательно-параллельных схем вычисления сценариев;
- перевод «наследуемых» переменных из результатов предыдущего прогона в начальное состояние следующего прогона внутри цикла ротации;
- встроенный стохастический генератор суточных погодных переменных.

Развитая интегрированная среда охватывает необходимые для анализа севооборотов аспекты моделирования. Поэтому комплекс APEX+AGROTOOL является подходящим инструментом для ориентированного на модели долгосрочного анализа различных севооборотов.

На рисунке 2 представлена соответствующая структура и схема информационных потоков для массовых многофакторных расчетов динамической модели продуктивности с учетом использования геоинформационных технологий.

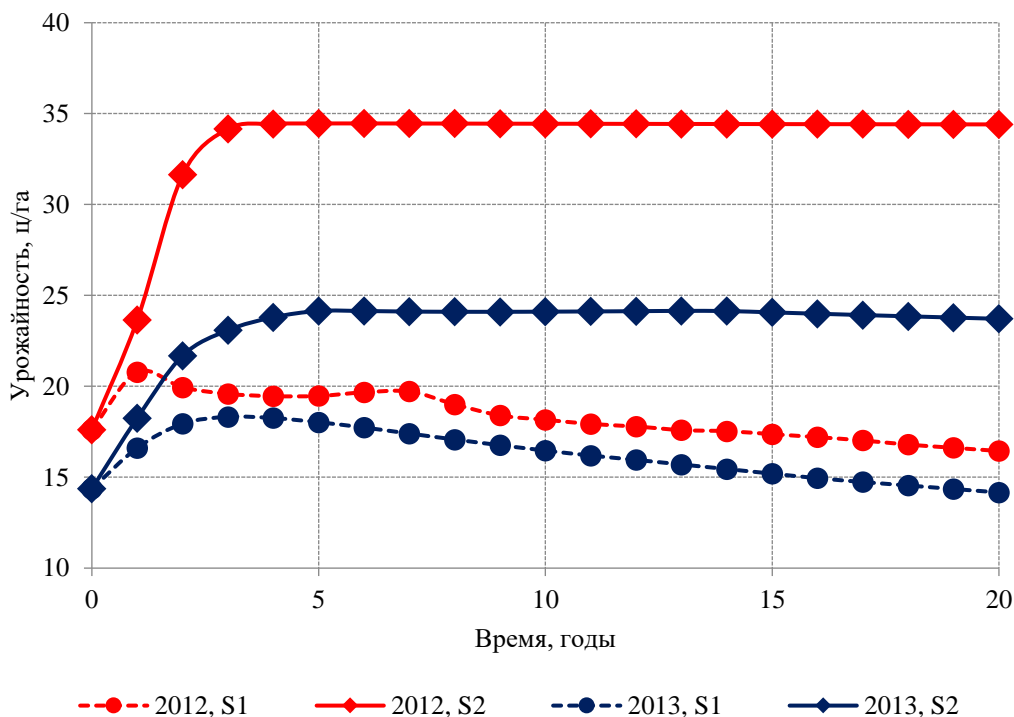


**Рисунок 2 – Структура и схема информационных потоков для массовых многофакторных расчетов динамической модели продуктивности**

### Результаты и их обсуждение

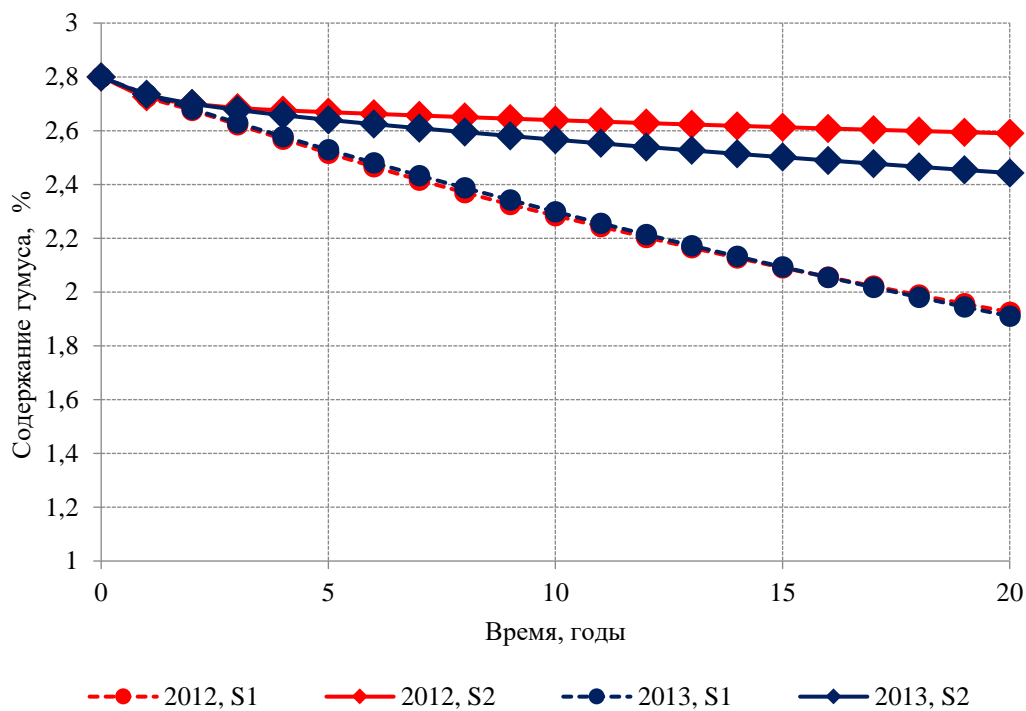
В данном разделе продемонстрированы возможности использования модели AGROTOOL в среде APEX для анализа долгосрочных последствий различных стратегий землепользования. Целью первого численного эксперимента было оценить два альтернативных метода уборки урожая и их влияние на основные показатели плодородия почвы. Альтернатива состоит в том, чтобы оставить или удалить с поля все растительные остатки. Один и тот же эталонный погодный сценарий использовали в качестве метеорологических входных данных для каждого последовательного выполнения модели во время многолетнего расчетного проекта. Это позволило снизить влияние межсезонной изменчивости погоды. Следует отметить, что простота реализации таких «виртуальных» эталонных условий является одним из важных преимуществ моделирования по сравнению со стандартными полевыми исследованиями. На рисунках 3–5 показана долгосрочная динамика параметров агроэкосистемы по результатам моделирования продукционного процесса яровой пшеницы для двух эталонных погодных

реализаций – вегетационные периоды 2012, 2013 гг. на Меньковской опытной станции Агрофизического НИИ (Ленинградская область).



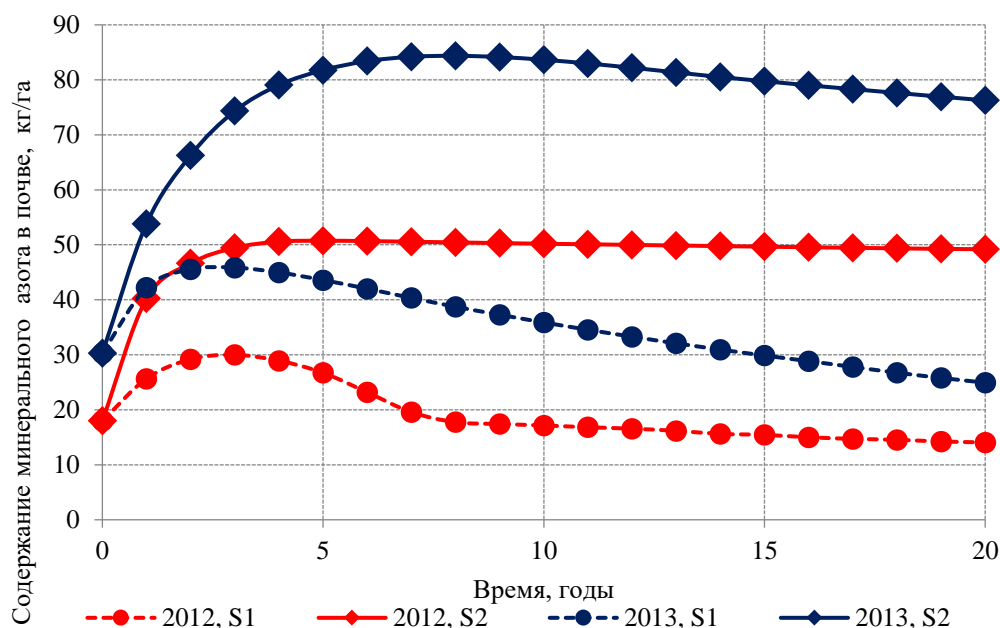
**Рисунок 3 – Долгосрочная динамика продуктивности яровой пшеницы**

*Примечание.* Здесь и далее: S1 – традиционная технология – вся надземная биомасса удалена с поля, S2 – технология «зеленых удобрений».



**Рисунок 4 – Долгосрочная динамика содержания гумуса в почве**





**Рисунок 5 – Долгосрочная динамика содержания минерального азота в метровом слое почвы**

Результаты, представленные на рисунках 3–5, демонстрируют различие традиционной технологии (вся надземная биомасса удаляется с поля) и технологии, при которой вся надземная биомасса «зеленых удобрений» остается на поле, по различным показателям: динамика валового сбора зерна (рисунок 3), динамика содержания гумуса в почве (рисунок 4) и динамика содержания минерального азота (рисунок 5).

В ходе исследования отмечены два специфических преимущества предложенного метода моделирования:

- AGROTOOL демонстрирует значительную чувствительность к влиянию факта наличия или отсутствия пожнивных остатков предшественника. То есть с его помощью можно исследовать влияние последовательности культур в схеме севооборота.

- Компьютерное моделирование позволяет оценить типичное время для агроландшафта, которое необходимо для достижения устойчивого состояния с экологической точки зрения.

Следующее, более комплексное исследование направлено на анализ сравнительной эффективности различных сельскохозяйственных мероприятий при формировании систем земледелия без учета негативного влияния возможных климатических изменений в долгосрочных последствиях.

Набор входных данных для этого вычислительного эксперимента включал следующие условия:

*Местоположение:* Меньковская опытная станция Агрофизического НИИ, Ленинградская область (59°25' с. ш., 30°02' в. д.).

*Почва:* супесь дерново-подзолистая, хорошо окультуренная.

*Культуры:* яровая пшеница (W), ячмень (B), озимая рожь (R), рапс (канола) (C), картофель (P), которые используют в различных циклах севооборота.

*Погода:* Восемь эталонных синтетических сценариев погоды, созданных оригинальным стохастическим погодным генератором на основе классического подхода Ричардсона-Райта (WGEN) [61, 62]. Климатические параметры были определены из 30-летних наборов фактических метеорологических данных для

ближайшей метеостанции «Белогорка» и модифицированы в соответствии с предоставленными Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC) [63] данными о возможных климатических изменениях для выбранного места: (2050, GCM HadCM3, Emission Scenario A2).

*Базовая технология:* без орошения и без минеральных удобрений.

План компьютерного эксперимента включал в себя, в зависимости от наличия дополнительных бобовых культур в севообороте, от 160 до 192 прогонов модели для одного тематического исследования. План включал восемь севооборотов продолжительностью пять лет с пятью культурами. Погодные условия были одинаковыми для каждой модели культуры, т. е. были сгенерированы погодные сценарии продолжительностью пять лет, и они повторялись. Основной план компьютерного эксперимента был повторен четыре раза (всего четыре блока с одинаковой погодой на пять лет) для сбора статистики долгосрочной временной динамики эффективности смягчающих мероприятий. Для сравнения мы провели анализ конкретных или усредненных значений для этих четырех различных блоков.

Были исследованы несколько альтернативных мероприятий, направленных на смягчение негативных последствий климатических изменений. В дальнейшем данные мероприятия будем называть «щадящими» (от английского термина «sparing»). Рассматривали пять разнотипных мероприятий (рисунок 6): А) выбор наилучшей последовательности посевов в схеме севооборота; Б) «щадящий» сбор урожая, когда на поле остаются пожнивные остатки; В) включение в севооборот бобовых культур (люпина) в качестве сидеральных удобрений (GM), обеспечивающих азотфиксацию; Г) внесение предпосевных органических удобрений (навоз крупного рогатого скота – коровяк); Д) добавление озимых промежуточных культур (сс) в общую схему севооборота с целью предотвращения потерь почвенного углерода.

**ТЕСТИРУЕМЫЕ "ЩАДЯЩИЕ" МЕРОПРИЯТИЯ**

**А) НАИЛУЧШАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ В СХЕМЕ СЕВООБОРОТА**

**Б) ОСТАВЛЕНИЕ ПОЖНИВНЫХ ОСТАТКОВ**

**В) БОБОВЫЕ КАК "ЗЕЛЕНАЯ" УДОБРЕНИЕ (ЛЮПИН)**

**Г) ОРГАНИЧЕСКОЕ УДОБРЕНИЕ (КОРОВАК)**

**Д) ПОЧВОЗАЩИТНЫЕ ОЗИМЫЕ КУЛЬТУРЫ (РАПС)**



**Рисунок 6 – Тестируемые мероприятия**

Последовательность численных экспериментов включала несколько этапов:

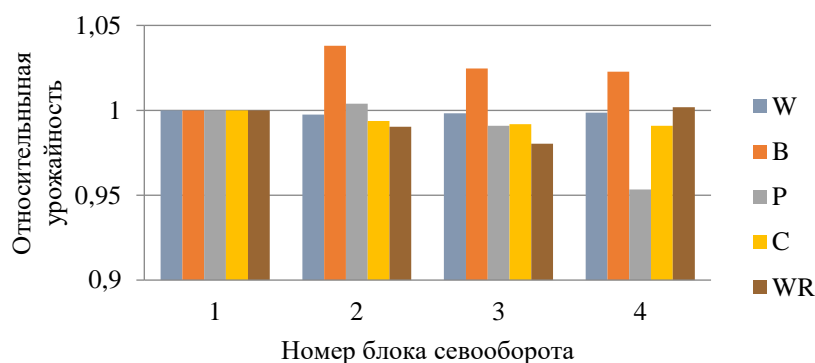
1. Расчет контрольного варианта (без мероприятий);
2. Исследование очередности культур в схеме севооборота. Общее количество:  $4! = 24$  исследованных варианта.
3. Выбор из пяти лучших вариантов очередности культур из предыдущего этапа для следующих этапов.
4. Исследование эффекта «щадящей» уборки с сохранением соломы на поле.
5. Анализ выращивания озимых промежуточных культур перед яровыми культурами.
6. Внесение органических удобрений.

7. Нахождение наилучшего места в выбранной схеме севооборота для дополнительного подсева сидеральных бобовых трав.

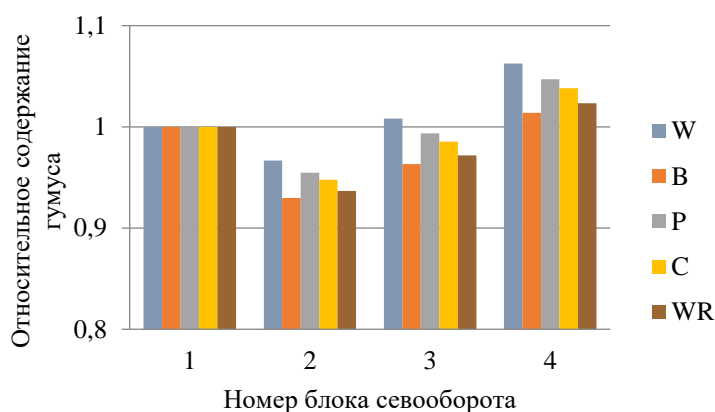
8. Исследование комплексного воздействия всех мероприятий.

Результаты для базового варианта (без мероприятий) представлены на рисунке 7. Здесь приведены относительные значения (доля показателя от значения в первом блоке), которые показывают отрицательную динамику. Урожай со временем снижается в зависимости от культуры. По ячменю динамика идет на плато, содержание гумуса падает.

Сравнительная эффективность протестированных мероприятий показана на рисунке 8. Соответствующая оценка рейтинга эффективности следующая: органические удобрения, сохранение пожнивных остатков, использование зернобобовых и озимых промежуточных культур, схема севооборота. Результаты для полного варианта (все меры) представлены на рисунке 9. Интересно сравнить результаты с рисунком 7. Урожайность не сильно снижается, а по некоторым культурам даже растет. Содержание гумуса в почве (выбранный показатель плодородия) не уменьшается. То есть, согласно результатам моделирования, применение всех мер органического земледелия позволяет сохранить и урожайность, и плодородие почвы.



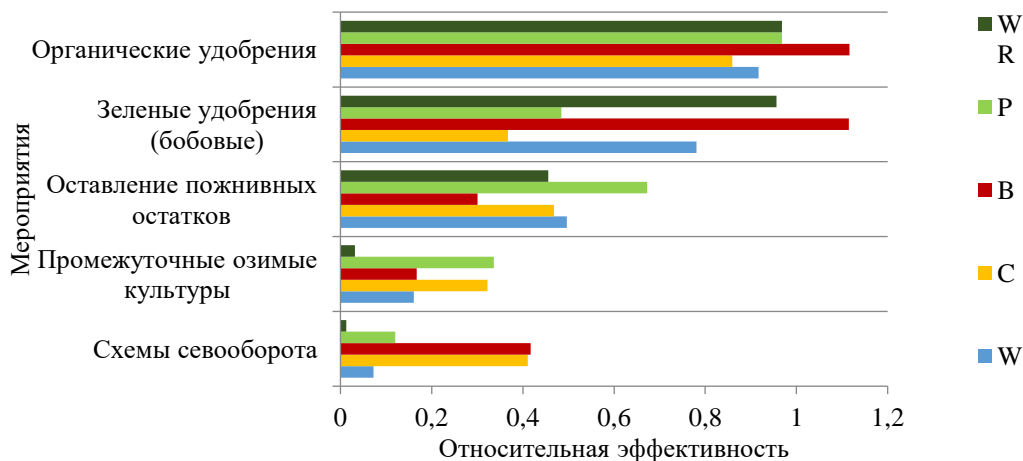
#### А. Динамика средней относительной урожайности



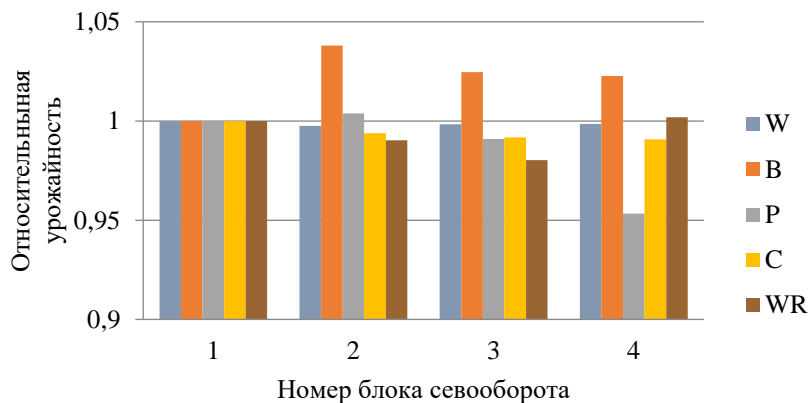
#### Б. Динамика содержания гумуса

#### Рисунок 7 – Результаты для базового варианта

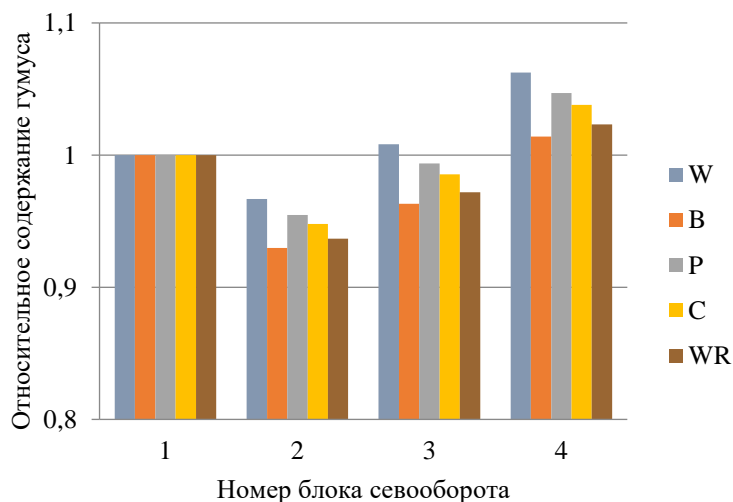
*Примечание. Здесь и далее: W – пшеница, B – ячмень, P – картофель, C – рапс, WR – озимая рожь представлены в виде доли показателя от значения в первом блоке (в следующих блоках 2, 3, 4 погода повторяется).*



**Рисунок 8 – Сравнительная эффективность протестированных мер – отношение индивидуальной выгоды к выгоде, полученной при использовании всех мер одновременно**



**А. Динамика средней относительной урожайности**



**Б. Динамика содержания гумуса**

**Рисунок 9 – Результаты для полного варианта**

### Выводы

Представленные в работе результаты показывают, что модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур имеют значительный потенциал для решения задач обеспечения информационной поддержки принятия решений по управлению сельскохозяйственным производством. Разработка систем поддержки принятия управленческих решений в сельскохозяйственном производстве на основе модельно-ориентированного подхода находится в тренде современных требований по цифровизации. Постоянно возникающие новые проблемы и вызовы требуют более интенсивного использования компьютерных методов моделирования роста и развития сельскохозяйственных культур для формирования устойчивых систем земледелия. Ключевыми особенностями разработанной интегрированной системы моделирования являются адаптируемость, возможность настройки и масштабируемость. Представленные в работе результаты показывают, что связка APEX+AGROTOOL может быть использована как эффективный инструмент для модельно-ориентированного долгосрочного и среднесрочного анализа различных схем севооборота в практике разработки и обоснования устойчивых систем земледелия.

Потенциальная востребованность предложенных методов продемонстрирована на примере успешного решения двух задач, связанных с оценкой альтернативных подходов к уборке урожая (оставление или удаление растительных остатков) и сравнительным анализом эффективности различных сельскохозяйственных мероприятий. Соответствующие вычислительные эксперименты учитывали множество факторов, чтобы максимально соответствовать реальной практике сельскохозяйственного землепользования. Полученные результаты показывают, что создан эффективный инструмент для анализа устойчивости возможных систем земледелия методами сравнительного количественного моделирования.

### Литература

1. Dury J., Schaller N., Garcia F., Reynaud A., Bergez, J. E. Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review // *Agronomy for sustainable development*. 2012. Vol. 32. No. 2. P. 567–580. DOI: 10.1007/s13593-011-0037-x.
2. Санин С. С. Защита растений и устойчивое земледелие в XXI столетии // *Защита и карантин растений*. 2020. № 4. С. 9–16.
3. Просянников Е. В. Агрехимические аспекты устойчивого земледелия // *Агрехимический вестник*. 2019. № 5. С. 13–17. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10068.
4. Power A. G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2010. Vol. 365. No. 1554. P. 2959–2971. DOI: 10.1098/rstb.2010.0143.
5. Carvalho F. P. Pesticides, environment, and food safety // *Food and Energy Security*. 2017. Vol. 6. No. 2. P. 48–60. DOI: 10.1002/fes3.108.
6. Четырбоцкий В. А., Четырбоцкий А. Н. Задачи численного моделирования динамики системы «почва-растение» // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020. Т. 12. № 2. С. 445–465. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-2-445-465.
7. Баденко В. Л., Гарманов В. В., Иванов Д. А., Савченко А. Н., Топаж А. Г. Перспективы использования динамических моделей агроэкосистем в задачах средне- и долгосрочного планирования сельскохозяйственного производства и землеустройства // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2015. № 1-2. С. 72–76.
8. Баденко В. Л., Топаж А. Г., Якушев В. В., Миршель В., Нендель К. Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 3. С. 437–445. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.437rus.
9. Баденко В. Л., Топаж А. Г., Медведев С. А., Захарова Е. Т., Дунаева Е. А. Оценка продуктивности агроландшафтов в региональном масштабе на основе интеграции имитационной



модели агроэкосистемы и ГИС // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 3. С. 18–30. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-18-30.

10. Немчикова К. А., Хворова Л. А. Поливариантный анализ динамической модели AGROTOOL на чувствительность // Прикладная математика и фундаментальная информатика. 2016. № 3. С. 123–129.

11. Badenko V., Terleev V., Topaj A. AGROTOOL software as an intellectual core of decision support systems in computer aided agriculture // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd. 2014. Vol. 635. P. 1688–1691. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.1688.

12. Topaj A., Mirschel W. Abnormal shapes of production function: model interpretations // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 145. P. 199–207. DOI: 10.1016/j.compag.2017.12.039.

13. Иванов Д. А. Ландшафтно-мелиоративные системы земледелия – новый этап экологизации сельскохозяйственного производства // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 9-2 (63). С. 96–100. DOI: 10.23670/IRJ.2017.63.084.

14. Kremen C., Ples A., Bacon C. Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture // Ecology and society. 2012. Vol. 17. No. 4. DOI: 10.5751/ES-05103-170444.

15. Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J. F., Ferrer A., Peigné J. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review // Agronomy for sustainable development. 2014. Vol. 34. No. 1. P. 1–20. DOI: 10.1007/s13593-013-0180-7.

16. Schmidt E., Tadesse F. The impact of sustainable land management on household crop production in the Blue Nile Basin, Ethiopia // Land Degradation & Development. 2019. Vol. 30. No. 7. P. 777–787. DOI: 10.1002/ldr.3266.

17. Хабаров Д. А., Валиев Д. С., Хабарова И. А. Теоретические основы организации рационального природопользования и охраны земель сельскохозяйственного назначения // Международный сельскохозяйственный журнал. 2019. № 1. С. 5–7. DOI: 10.24411/2587-6740-2019-11001.

18. Kaim A., Cord A. F., Volk M. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation // Environmental Modelling & Software. 2018. Vol. 105. P. 79–93. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.03.031.

19. Welfle A., Gilbert P., Thornley P., Stephenson A. Generating low-carbon heat from biomass: life cycle assessment of bioenergy scenarios // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 149. P. 448–460. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.035.

20. Матеев Е. З., Королькова Н. В., Константинов В. Е., Кубасова А. Н., Глотова И. А., Шахов С. В. Тенденции и инновации при производстве и переработке масличных культур // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2017. № 3. С. 123–131. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2017.3.123.

21. Eichler Inwood S. E., López-Ridaura S., Kline K. L., Gérard B., Monsalve A. G., Govaerts B., Dale V. H. Assessing sustainability in agricultural landscapes: a review of approaches // Environmental Reviews. 2018. Vol. 26. No. 3. P. 299–315. DOI: 10.1139/er-2017-0058.

22. Pratt C., Kingston K., Laycock B., Levett I., Pratt S. Geo-agriculture: reviewing opportunities through which the geosphere can help address emerging crop production challenges // Agronomy. 2020. Vol. 10. No. 7. P. 971. DOI: 10.3390/agronomy10070971.

23. Mason P. M., Glover K., Smith J. A. C., Willis K. J., Woods J., Thompson I. P. The potential of CAM crops as a globally significant bioenergy resource: moving from ‘fuel or food’ to ‘fuel and more food’ // Energy & Environmental Science. 2015. Vol. 8. No. 8. P. 2320–2329. DOI: 10.1039/c5ee00242g.

24. Лопырев М. И., Постолов В. Д., Чечин Д. И., Недикова Е. В., Адрихин В. В., Цебегеев В. И. Конструирование экологически устойчивых агроландшафтов – новый этап в развитии землеустройства и земледелия // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2008. № 3. С. 20–26.

25. Черемисинов А. Ю., Черемисинов А. А. Агроландшафты и устойчивое развитие // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2018. № 2. С. 21–25.

26. Радченко Л. А., Радченко А. Ф. Урожайность и качество зерна сортов пшеницы озимой в условиях степного Крыма // Таврический вестник аграрной науки. 2017. № 1. С. 71–79.

27. Приходько А. В., Сусский А. Н., Моляр С. А. Альтернативные источники улучшения плодородия почвы в условиях Крыма // Таврический вестник аграрной науки. 2016. № 2. С. 24–35.

28. Rötter R. P., Hoffmann M. P., Koch M., Müller C. Progress in modelling agricultural impacts of and adaptations to climate change // Current Opinion in Plant Biology. 2018. Vol. 45. P. 255–261. DOI: 10.1016/j.pbi.2018.05.009.

29. Basso B., Liu L. Seasonal crop yield forecast: methods, applications, and accuracies // Advances in agronomy. 2019. Vol. 154. P. 201–255. DOI: 10.1016/bs.agron.2018.11.002.

30. Antle J. M., Jones J. W., Rosenzweig C. Next generation agricultural system models and knowledge products: synthesis and strategy // *Agric Syst.* 2017. Vol. 155. P. 179–185. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.05.006.
31. Badenko V., Badenko G., Topaj A., Medvedev S., Zakharova E., Terleev V. Comparative simulation of various agricultural land use practices for analysis of impacts on environments // *Environments.* 2017. Vol. 4. No. 4. P. 92. DOI: 0.3390/environments4040092.
32. Kang M., Wang F. Y. From parallel plants to smart plants: intelligent control and management for plant growth // *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica.* 2017. Vol. 4. No. 2. P. 161–166. DOI: 10.1109/JAS.2017.7510487.
33. Capalbo S. M., Antle J. M., Seavert C. Next generation data systems and knowledge products to support agricultural producers and science-based policy decision making // *Agricultural Systems.* 2017. Vol. 155. P. 191–199. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.10.009.
34. Аксенов А. Г. Анализ интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сельском хозяйстве // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК.* 2019. № 3. С. 46–51.
35. Janssen S. J. C., Porter C. H., Moore A. D., Athanasiadis I. N., Foster I., Jones J. W., Antle J. M. Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: information and communication technology // *Agricultural Systems.* 2017. Vol. 155. P. 200–212. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.09.017.
36. Paut R., Sabatier R., Tchamitchian M. Modelling crop diversification and association effects in agricultural systems // *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2020. Vol. 288. P. 106711. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106711.
37. Баденко В. Л., Иванов Д. А., Топаж А. Г. Информационное обеспечение агроландшафтных исследований // *Информация и космос.* 2014. № 4. С. 52–54.
38. Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В. В., Топаж А. Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2006. 396 с.
39. Zhai Z., Martínez J. F., Beltran V., Martínez N. L. Decision support systems for agriculture 4.0: survey and challenges // *Computers and Electronics in Agriculture.* 2020. Vol. 170. P. 105256. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.
40. Bhatia M., Rana A. A mathematical approach to optimize crop allocation – a linear programming model // *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics.* 2020. Vol. 15. No. 2. P. 245–252. DOI: 10.18280/ijdne.150215.
41. Иванько Я. М., СторуBLEвцева П. М. Моделирование аграрного производства с применением прогностических зависимостей и планируемых показателей // *Актуальные вопросы аграрной науки.* 2020. № 34. С. 59–66.
42. Fielke S., Taylor B., Jakku E. Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review // *Agricultural Systems.* 2020. Vol. 180. P. 102763. DOI: 10.1016/j.agsy.2019.102763.
43. Lecercf R., Ceglar A., López-Lozano R., Van Der Velde M., Baruth B. Assessing the information in crop model and meteorological indicators to forecast crop yield over Europe // *Agricultural Systems.* 2019. Vol. 168. P. 191–202. DOI: 10.1016/j.agsy.2018.03.002.
44. Shelia V., Hansen J., Sharda V., Porter C., Aggarwal P., Wilkerson C. J., Hoogenboom G. A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies // *Environmental Modelling & Software.* 2019. Vol. 115. P. 144–154. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.006.
45. Teixeira E. I., de Ruiter J., Ausseil A. G., Daigneault A., Johnstone P., Holmes A., Tait A., Ewert F. Adapting crop rotations to climate change in regional impact modelling assessments // *Science of the Total Environment.* 2018. Vol. 616. P. 785–795. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.247.
46. Маракаева Т. В., Ноженко Т. В., Некрасова Е. В. Организация систем севооборотов с учетом баланса гумуса на основе экономико-математического моделирования // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета.* 2017. № 8 (154). С. 63–67.
47. Хворова Л. А., Топаж А. Г., Абрамова А. В. Математическая модель симбиотической азотфиксации // *Известия Алтайского государственного университета.* 2015. № 1/2 (85). С. 158–163. DOI: 10.14258/izvasu(2015)1.2-29.
48. Карманов И. И., Булгаков Д. С., Шишконова Е. А. Система оценки природно-антропогенных воздействий на изменение плодородия почв пахотных земель на основе почвенно-агроклиматического индекса // *Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева.* 2013. № 72. С. 65–83.
49. Ozturk I., Sharif B., Baby S., Jabloun M., Olesen J. E. The long-term effect of climate change on productivity of winter wheat in Denmark: a scenario analysis using three crop models // *The Journal of Agricultural Science.* 2017. Vol. 155. No. 5. P. 733–750. DOI: 10.1017/S0021859616001040.

50. Tully K., Ryals R. Nutrient cycling in agroecosystems: balancing food and environmental objectives // *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 2017. Vol. 41. No. 7. P. 761–798. DOI: 10.1080/21683565.2017.1336149.
51. Пивченко Д. В., Мешалкина Ю. Л., Васенев И. И., Тихонова М. В., Визирская М. М. Опыт адаптации системы DSSAT для моделирования урожая озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в условиях Московской области // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2019. № 1. С. 33–39. DOI: 10.26178/АЕ.2019.64.37.006.
52. Malik W., Jiménez-Aguirre M. T., Dechmi F. Coupled DSSAT-SWAT models to reduce off-site N pollution in Mediterranean irrigated watershed // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 745. P. 141000. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141000.
53. Jones J. W., Hoogenboom G., Porter C. H., Boote K. J., Batchelor W. D., Hunt L. A., Wilkens P. W., Singh U., Gijsman A. J., Ritchie J. T. The DSSAT cropping system model // *European Journal of Agronomy*. 2003. Vol. 18. No. 3-4. P. 235–265. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7.
54. Sarkar R., Kar S. Sequence analysis of DSSAT to select optimum strategy of crop residue and nitrogen for sustainable rice-wheat rotation // *Agronomy Journal*. 2008. Vol. 100. No. 1. P. 87–97. DOI: 10.2134/agronj2006.0241.
55. Salmerón M., Cavero J., Isla R., Porter C. H., Jones J. W., Boote K. J. DSSAT nitrogen cycle simulation of cover crop–maize rotations under irrigated Mediterranean conditions // *Agronomy Journal*. 2014. Vol. 106. No. 4. P. 1283–1296. DOI: 10.2134/agronj13.0560.
56. Köstner B., Wenkel K. O., Berg M., Bernhofer C., Gömann H., Weigel H. J. Integrating regional climatology, ecology, and agronomy for impact analysis and climate change adaptation of German agriculture: an introduction to the LandCaRe2020 project // *European Journal of Agronomy*. 2014. Vol. 52. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.eja.2013.08.003.
57. Казанцев В. О., Медведев С. А. Разработка программного адаптера для системы поливариантного анализа динамических моделей продукционного процесса культурных растений // *Прикладная математика и фундаментальная информатика*. 2015. № 2. С. 131–134.
58. De Wit C. T. Coordination of models // In book: *Simulation of plant growth and crop protection*. 1982. С. 26–31. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://edepot.wur.nl/171941> (дата обращения 02.02.2021).
59. Терлеев В. В., Гиневский Р. С., Лазарев В. А., Топаж А. Г., Дунаева Е. А. Функциональное представление гидрофизических свойств почвы и его верификация // *Агрофизика*. 2020. № 2. С. 61–69. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.02.09.
60. Медведев С. А., Полуэктов Р. А., Топаж А. Г. Оптимизация стратегии орошения с использованием методов поливариантного анализа динамики агроэкосистем // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2012. № 2. С. 10–13.
61. Топаж А. Г., Кюнкель К. Й. Статистические оценки агрометеорологических показателей по среднемесячным данным // *Метеорология и гидрология*. 1997. № 7. С. 99–107.
62. Soltani A., Latifi N., Nasiri M. Evaluation of WGEN for generating long term weather data for crop simulations // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2000. Vol. 102. No. 1. P. 1–12. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00100-3.
63. Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2017. Vol. 37. No. 12. P. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.

## References

1. Dury J., Schaller N., Garcia F., Reynaud A., Bergez, J. E. Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review // *Agronomy for sustainable development*. 2012. Vol. 32. No. 2. P. 567–580. DOI: 10.1007/s13593-011-0037-x.
2. Sanin S. S. Plant protection and sustainable agriculture in the XXI century // *Plant protection and quarantine*. 2020. No. 4. P. 9–16.
3. Prosyannikov E. V. Agrochemical aspects of sustainable agriculture // *Agrochemical Herald*. 2019. No. 5. P. 13–17. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10068.
4. Power A. G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2010. Vol. 365. No. 1554. P. 2959–2971. DOI: 10.1098/rstb.2010.0143.
5. Carvalho F. P. Pesticides, environment, and food safety // *Food and Energy Security*. 2017. Vol. 6. No. 2. P. 48–60. DOI: 10.1002/fes3.108.
6. Chetyrbotskiy V. A., Chetyrbotskiy A. N. Problems of numerical simulation in the dynamics system “soil-plant” // *Computer Research and Modeling*. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 445–465. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-2-445-465.

7. Badenko V. L., Garmanov V. V., Ivanov D. A., Savchenko A. N., Topaj A. G. Prospects of application of dynamic crop models in the problems of long-term planning in agriculture and land management // *Russian Agricultural Sciences*. 2015. No. 1-2. P. 72–76.
8. Badenko V. L., Topaj A. G., Yakushev V. V., Mirschel W., Nendel C. Crop models as research and interpretative tools // *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2017. Vol. 52. No. 3. P. 437–445. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.437rus.
9. Badenko V. L., Topazh A. G., Medvedev S. A., Zakharova E. T., Dunaieva I. A. Assessment of productivity of agrolandscapes on the regional scale on the basis of integration of the simulation model of agroecosystem and GIS // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2019. No. 3. P. 18–30. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-18-30.
10. Nemchikova K. A., Khvorova L. A. The multivariant analysis of dynamic model AGROTOOL on sensitivity // *Applied Mathematics and Fundamental Computer Science*. 2016. No. 3. P. 123–129.
11. Badenko V., Terleev V., Topaj A. AGROTOOL software as an intellectual core of decision support systems in computer aided agriculture // *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd. 2014. Vol. 635. P. 1688–1691. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.1688.
12. Topaj A., Mirschel W. Abnormal shapes of production function: model interpretations // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 145. P. 199–207. DOI: 10.1016/j.compag.2017.12.039.
13. Ivanov D. A. Landscape and meliorative systems of agriculture – a new stage of environmental agricultural production // *International Research Journal*. 2017. No. 9-2 (63). P. 96–100. DOI: 10.23670/IRJ.2017.63.084.
14. Kremen C., Iles A., Bacon C. Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture // *Ecology and society*. 2012. Vol. 17. No. 4. DOI: 10.5751/ES-05103-170444.
15. Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J. F., Ferrer A., Peigné J. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review // *Agronomy for Sustainable Development*. 2014. Vol. 34. No. 1. P. 1–20. DOI: 10.1007/s13593-013-0180-7.
16. Schmidt E., Tadesse F. The impact of sustainable land management on household crop production in the Blue Nile Basin, Ethiopia // *Land Degradation & Development*. 2019. Vol. 30. No. 7. P. 777–787. DOI: 10.1002/ldr.3266.
17. Khabarov D. A., Valiev D. S., Khabarova I. A. Theoretical bases of the organization of rational nature management and protection of lands of agricultural purpose // *International Agricultural Journal*. 2019. No. 1. P. 5–7. DOI: 10.24411/2587-6740-2019-11001.
18. Kaim A., Cord A. F., Volk M. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation // *Environmental Modelling & Software*. 2018. Vol. 105. P. 79–93. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.03.031.
19. Welfle A., Gilbert P., Thornley P., Stephenson A. Generating low-carbon heat from biomass: life cycle assessment of bioenergy scenarios // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 149. P. 448–460. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.035.
20. Mateev E. Z., Korolkova N. V., Konstantinov V. E., Kubasova A. N., Glotova I. A., Shakhov S. V. Trends and innovations in the production and processing of oil crops // *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2017. No. 3. P. 123–131. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2017.3.123.
21. Eichler Inwood S. E., López-Ridaura S., Kline K. L., Gérard B., Monsalve A. G., Govaerts B., Dale V. H. Assessing sustainability in agricultural landscapes: a review of approaches // *Environmental Reviews*. 2018. Vol. 26. No. 3. P. 299–315. DOI: 10.1139/er-2017-0058.
22. Pratt C., Kingston K., Laycock B., Levett I., Pratt S. Geo-agriculture: reviewing opportunities through which the geosphere can help address emerging crop production challenges // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 7. P. 971. DOI: 10.3390/agronomy10070971.
23. Mason P. M., Glover K., Smith J. A. C., Willis K. J., Woods J., Thompson I. P. The potential of CAM crops as a globally significant bioenergy resource: moving from 'fuel or food' to 'fuel and more food' // *Energy & Environmental Science*. 2015. Vol. 8. No. 8. P. 2320–2329. DOI: 10.1039/c5ee00242g.
24. Lopyrev M. I., Postolov V. D., Chechin D. I., Nedikova E. V., Aderikhin V. V., Tsebegeev V. I. Designing environmentally sustainable agricultural landscapes – a new stage in the development of land management and agriculture // *Land management, monitoring and cadastre*. 2008. No. 3. P. 20–26.
25. Cheremisinov A. Y., Cheremisinov A. A. Agrolandscapes and sustainable development // *Models and technologies of environmental engineering at the regional level*. 2018. No. 2. P. 21–25.
26. Radchenko L. A., Radchenko A. F. Productivity and quality of winter wheat varieties under the conditions of the steppe Crimea // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2017. No. 1. P. 71–79.
27. Prikhodko A. V., Sysskiy A. N., Molyar S. A. Alternative sources of soil fertility improvement under the conditions of the Crimea // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2016. No. 2. P. 24–35.



28. Rötter R. P., Hoffmann M. P., Koch M., Müller C. Progress in modelling agricultural impacts of and adaptations to climate change // *Current Opinion in Plant Biology*. 2018. Vol. 45. P. 255–261. DOI: 10.1016/j.pbi.2018.05.009.
29. Basso B., Liu L. Seasonal crop yield forecast: methods, applications, and accuracies // *Advances in Agronomy*. 2019. Vol. 154. P. 201–255. DOI: 10.1016/bs.agron.2018.11.002.
30. Antle J. M., Jones J. W., Rosenzweig C. Next generation agricultural system models and knowledge products: synthesis and strategy // *Agric Syst*. 2017. Vol. 155. P. 179–185. DOI: 10.1016/j.agry.2017.05.006.
31. Badenko V., Badenko G., Topaj A., Medvedev S., Zakharova E., Terleev V. Comparative simulation of various agricultural land use practices for analysis of impacts on environments // *Environments*. 2017. Vol. 4. No. 4. P. 92. DOI: 10.3390/environments4040092.
32. Kang M., Wang F. Y. From parallel plants to smart plants: intelligent control and management for plant growth // *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2017. Vol. 4. No. 2. P. 161–166. DOI: 10.1109/JAS.2017.7510487.
33. Capalbo S. M., Antle J. M., Seavert C. Next generation data systems and knowledge products to support agricultural producers and science-based policy decision making // *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 155. P. 191–199. DOI: 10.1016/j.agry.2016.10.009.
34. Aksenov A. G. Analysis of intelligent decision support systems in agriculture // *Electrical engineering and electrical equipment in agriculture*. 2019. No. 3. P. 46–51.
35. Janssen S. J. C., Porter C. H., Moore A. D., Athanasiadis I. N., Foster I., Jones J. W., Antle J. M. Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: information and communication technology // *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 155. P. 200–212. DOI: 10.1016/j.agry.2016.09.017.
36. Paut R., Sabatier R., Tchamitchian M. Modelling crop diversification and association effects in agricultural systems // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2020. Vol. 288. P. 106711. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106711.
37. Badenko V. L., Ivanov D. A., Topazh A. G. Information support of agro-landscape researches // *Information and Space*. 2014. No. 4. P. 52–54.
38. Poluektov R. A., Smolyar E. I., Terleev V. V., Topaj A. G. Models of Production Process of Agricultural Crops. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University, 2006. 396 p.
39. Zhai Z., Martínez J. F., Beltran V., Martínez N. L. Decision support systems for agriculture 4.0: survey and challenges // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 170. P. 105256. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.
40. Bhatia M., Rana A. A Mathematical approach to optimize crop allocation – a linear programming model // *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*. 2020. Vol. 15. No. 2. P. 245–252. DOI: 10.18280/ijdne.150215.
41. Ivanyo Ya. M., Storablevtseva P. M. Modeling of agricultural production using prognostic dependencies and planned indicators // *Actual Issues of Agrarian Science*. 2020. No. 34. P. 59–66.
42. Fielke S., Taylor B., Jakku E. Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: a state-of-the-art review // *Agricultural Systems*. 2020. Vol. 180. P. 102763. DOI: 10.1016/j.agry.2019.102763.
43. Lecerc R., Ceglar A., López-Lozano R., Van Der Velde M., Baruth B. Assessing the information in crop model and meteorological indicators to forecast crop yield over Europe // *Agricultural Systems*. 2019. Vol. 168. P. 191–202. DOI: 10.1016/j.agry.2018.03.002.
44. Shelia V., Hansen J., Sharda V., Porter C., Aggarwal P., Wilkerson C. J., Hoogenboom G. A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies // *Environmental Modelling & Software*. 2019. Vol. 115. P. 144–154. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.006.
45. Teixeira E. I., de Ruiter J., Ausseil A. G., Daigneault A., Johnstone P., Holmes A., Tait A., Ewert F. Adapting crop rotations to climate change in regional impact modelling assessments // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 616. P. 785–795. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.247.
46. Marakayeva T. V., Nozhenko T. V., Nekrasova Y. V. Crop rotation system planning according to humus balance based on economic and mathematic modeling // *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017. No. 8 (154). P. 63–67.
47. Khvorova L. A., Topaj A. G., Abramova A. V. A mathematical model of symbiotic nitrogen fixation // *Izvestiya of Altai State University*. 2015. No. 1/2 (85). P. 158–163. DOI: 10.14258/izvasu(2015)1.2-29.
48. Karmanov I. I., Bulgakov D. S., Shishkonakova E. A. An assessment system of natural and anthropogenic effects on changes // *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2013. No. 72. P. 65–83.



49. Ozturk I., Sharif B., Baby S., Jabloun M., Olesen J. E. The long-term effect of climate change on productivity of winter wheat in Denmark: a scenario analysis using three crop models // *The Journal of Agricultural Science*. 2017. Vol. 155. No. 5. P. 733–750. DOI: 10.1017/S0021859616001040.
50. Tully K., Ryals R. Nutrient cycling in agroecosystems: balancing food and environmental objectives // *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 2017. Vol. 41. No. 7. P. 761–798. DOI: 10.1080/21683565.2017.1336149.
51. Pivchenko D. V., Meshalkina J. L., Vasenev I. I., Tikhonova M. V., Vizirskaya M. M. A case study of DSSAT application to simulate winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield in Moscow region // *Agrochemistry and ecology problems*. 2019. No. 1. P. 33–39. DOI: 10.26178/AE.2019.64.37.006.
52. Malik W., Jiménez-Aguirre M. T., Dechmi F. Coupled DSSAT-SWAT models to reduce off-site N pollution in Mediterranean irrigated watershed // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 745. P. 141000. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141000.
53. Jones J. W., Hoogenboom G., Porter C. H., Boote K. J., Batchelor W. D., Hunt L. A., Wilkens P. W., Singh U., Gijsman A. J., Ritchie J. T. The DSSAT cropping system model // *European Journal of Agronomy*. 2003. Vol. 18. No. 3-4. P. 235–265. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7.
54. Sarkar R., Kar S. Sequence analysis of DSSAT to select optimum strategy of crop residue and nitrogen for sustainable rice-wheat rotation // *Agronomy Journal*. 2008. Vol. 100. No. 1. P. 87–97. DOI: 10.2134/agronj2006.0241.
55. Salmerón M., Cavero J., Isla R., Porter C. H., Jones J. W., Boote K. J. DSSAT nitrogen cycle simulation of cover crop–maize rotations under irrigated Mediterranean conditions // *Agronomy Journal*. 2014. Vol. 106. No. 4. P. 1283–1296. DOI: 10.2134/agronj13.0560.
56. Köstner B., Wenkel K. O., Berg M., Bernhofer C., Gömann H., Weigel H. J. Integrating regional climatology, ecology, and agronomy for impact analysis and climate change adaptation of German agriculture: An introduction to the LandCaRe2020 project // *European Journal of Agronomy*. 2014. Vol. 52. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.eja.2013.08.003.
57. Kazantsev V. O., Medvedev S. A. Software adapter development for polyalternativeness dynamic crop plants production process models analysis system // *Applied Mathematics and Fundamental Computer Science*. 2015. No. 2. P. 131–134.
58. De Wit C. T. Coordination of models // *Simulation of plant growth and crop protection*. 1982. P. 26–31. [Electronic resource]. Access point: edepot.wur.nl/171941 (reference's date 02.02.2021).
59. Terleev V. V., Ginevsky R. S., Lazarev V. A., Topaj A. G., Dunaieva E. A. Functional description of hydrophysical soil properties and its verification // *Agrophysica*. 2020. No. 2. P. 61–69. DOI: 10.25695/AGRP.2020.02.09.
60. Medvedev S. A., Poluektov R. A., Topazh A. G. Optimization of irrigation strategies using multivariate analysis methods of the agroecosystems dynamics // *Melioration and Water Management*. 2012. No. 2. P. 10–13.
61. Topaj A. G., Künkel K. J. Statistical estimates of agrometeorological indicators based on monthly average data // *Russian meteorology and hydrology*. 1997. No. 7. P. 99–107.
62. Soltani A., Latifi N., Nasiri M. Evaluation of WGEN for generating long term weather data for crop simulations // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2000. Vol. 102. No. 1. P. 1–12. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00100-3.
63. Fick S. E., Hijmans R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2017. Vol. 37. No. 12. P. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.

UDC 631.9+519.6

Badenko V. L., Topazh A. G., Medvedev S. A., Zakharova E. T.

### **MODELS OF THE PRODUCTION PROCESS OF AGRICULTURAL PLANTS FOR THE ANALYSIS OF THE ELEMENTS OF SOME FARMING SYSTEMS**

*Summary.* Currently, there are major changes in the concept of designing farming systems. They are associated with bridging the gap between socio-economic demands for increasing agricultural production and the scientific justification for sustainable agricultural land use. The article presents the results of solving this problem based on the use of an integrated system for modeling the production process of agricultural plants developed by the authors. This system was applied to analyze various agricultural technologies, in particular, alternative strategies for planning crop rotations in cropping

systems. For this, the following tools existing in the environment of the developed system were used: 1) long-term analysis of a possible change in the fertility of agricultural fields when using different agricultural technologies; 2) substantiation of the selected crop rotation scheme, which includes various agricultural technologies and resource-saving measures; 3) model-based approach to assess the comparative effectiveness of alternative land use strategies. The first part of the article presents the results obtained using tools for assessment alternative agricultural technologies for harvesting associated with the abandonment or removal of plant residues from the agricultural field, as well as the impact of these agricultural technologies on the parameters of soil fertility in the long term. The results of the simulation show that the abandonment of crop residues has a positive effect on the dynamics of humus in the soil and on the nitrogen content in the meter soil layer. In the second part of the article, the results of the analysis of the comparative effectiveness of various crop rotation schemes and such agricultural activities as the application of organic fertilizers, the use of leguminous and winter catch crops are presented. The analysis made it possible to rank these measures in terms of the effectiveness of the impact on agricultural production; the use of organic fertilizers (manure) and including legumes in the crop rotation were the most effective ones. The presented results demonstrate the potential demand for the proposed methods and the developed integrated system for modeling the production process of agricultural plants to substantiate the elements of farming systems and analyze their impact on sustainable development.

**Keywords:** simulation model of agroecosystem, crop rotations, agricultural technologies, sustainability of agricultural systems.

Баденко Владимир Львович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования агроэкосистем ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14; e-mail: vbadenko@gmail.com.

Топаж Александр Григорьевич, доктор технических наук, заместитель директора по науке ООО «Бюро Гиперборея»; 193312, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Подвойского, 40, корп. 2, кв. 87; e-mail: aleksandr.topazh@bureauhyperborea.ru.

Медведев Сергей Алексеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории математического моделирования агроэкосистем ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14; e-mail: glorguin@yandex.ru.

Захарова Елена Томовна, научный сотрудник лаборатории математического моделирования агроэкосистем ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14; e-mail: elenazaharova.afi@gmail.com.

Badenko Vladimir Lvovich, Dr. Sc. (Tech.), chief researcher, Laboratory for mathematical modeling of agroecosystems, FSBSI "Agrophysical Research Institute"; 14, Grazhdanskiy prospect, Saint-Petersburg, 195220, Russia; e-mail: vbadenko@gmail.com.

Topazh Aleksandr Grigoryevich, Dr. Sc. (Tech.), deputy director for science, "Bureau Hyperborea", Ltd.; 40, Podvoiskiy str. flat 87, build. 2, Saint-Petersburg, 193312; Russia; e-mail: aleksandr.topazh@bureauhyperborea.ru.

Medvedev Sergey Alekseevich, Cand. Sc. (Agr.), researcher, Laboratory for mathematical modeling of agroecosystems, FSBSI "Agrophysical Research Institute"; 14, Grazhdanskiy prospect, Saint-Petersburg, 195220, Russia; e-mail: glorguin@yandex.ru.

Zakharova Elena Tomovna, researcher, Laboratory for mathematical modeling of agroecosystems, FSBSI "Agrophysical Research Institute"; 14, Grazhdanskiy prospect, Saint-Petersburg, 195220, Russia; e-mail: elenazaharova.afi@gmail.com.

Дата поступления в редакцию – 20.01.2021.

Дата принятия к печати – 21.02.2021.