

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АГРОЭКОСИСТЕМЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В.Л. БАДЕНКО¹, А.Г. ТОПАЖ¹, В.В. ЯКУШЕВ¹, В. МИРШЕЛЬ², К. НЕНДЕЛЬ²

Механистический (экофизиологический) подход к имитационному моделированию формирования урожая предполагает рассмотрение сущности процессов и причинно-следственных связей в агроэкоecosистеме с описанием их динамики на основе физически интерпретируемых зависимостей (в отличие от логически интерпретируемых зависимостей при эмпирическом подходе) (А. Di Paola с соавт., 2016; Р.А. Полуэктов, 2010). Нами проанализировано потенциальное применение динамических имитационных процесс-ориентированных (механистических) моделей агроэкоecosистем в прикладной и теоретической сельскохозяйственной биологии. Имеющий опыт разработки и использования таких моделей показывает, что они более приспособлены для исследовательских целей, но менее полезны и востребованы в практической агрономии. На конкретных примерах в компьютерных экспериментах с разработанными авторами моделями продемонстрирована возможность получения нетривиальных результатов, не заложенных напрямую в логику алгоритмов моделей (V. Badenko с соавт., 2014; S. Medvedev с соавт., 2015). Обсуждается роль имитационной модели как научного инструмента приобретения нового знания об объекте и интерпретации эмпирически наблюдаемых явлений. Для демонстрации потенциала имитационного моделирования в сельскохозяйственной биологии рассмотрены результаты исследований авторов по анализу причин проявления немонотонной формы у функции отклика урожайности на дозы внесения азотных удобрений, по интерпретации эффекта тайминга при управлении азотными подкормками по листу и по изучению совместного влияния водного и азотного стресса на продуктивность посевов культур. На основании данных литературы проанализированы перспективы применения моделей как современного элемента селекционного процесса для его ускорения. Делается вывод о том, что необходимым условием успешного развития динамического моделирования служит биологизация имеющихся моделей, а также существенное повышение научной обоснованности подходов при описании биотических процессов в системе почва—растение—атмосфера.

Ключевые слова: имитационная модель агроэкоecosистемы, продукционный процесс, процесс-ориентированные модели, идеотипы, ускоренная селекция, G×E×M-ориентированные модели.

Имитационное моделирование продукционного процесса растений — это самостоятельное научное направление с собственной методологией и историей становления (1, 2), в котором выделились качественно различающиеся подходы к созданию и использованию компьютерных моделей, в иностранной литературе традиционно обозначаемые как механистический, или процесс-ориентированный, и эмпирический (3). Эмпирический (функциональный) подход характеризуется широким использованием эвристического описания определяющих процессов (применяются регрессионные соотношения, уравнения аллометрии, многочисленные функции стресса и т.п.). Подобное формальное описание на логическом уровне может хорошо отражать свойства реальной системы в терминах «вход—выход» в сравнительно узком классе и ограниченном диапазоне влияющих факторов, но почти не привязано к сути физических, химических и биологических явлений в системе почва—растение—атмосфера (4). Напротив, механистический (экофизиологический) подход предполагает рассмотрение сущности процессов и причинно-следственных связей в агроэкоecosистеме с описанием их динамики на основе физически интерпретируемых зависимостей (в отличие от логически интерпретируемых зависимостей при эмпирическом подходе). Математическим аппаратом теоретических моделей служат системы дифференциальных или разностных уравнений, как правило, описывающие баланс вещества и энергии для каждого из рассматриваемых пространственно-функциональных компартментов. Число факторов и процессов, которые следует принимать во внимание для создания комплексной, устойчивой и непротиворечивой модели формирования урожая в посеве в рамках полно-

стью механистического подхода, крайне затрудняет достижение такой цели. Поэтому на сегодняшний день более всего претендуют на научную обоснованность базовые модели продукционного процесса (5), представляющие собой синтез процесс-ориентированного и эмпирического описаний.

При становлении теории и методологии имитационного моделирования в агроэкологии ставился вопрос о применимости компьютерных моделей. Были обозначены пять целей (6), в соответствии с которыми гипотетическая идеальная модель продукционного процесса растений может быть средством общения специалистов, познания, обучения, целенаправленного планирования экспериментов и инструментом принятия решения при управлении сложными системами. Первые две роли скорее имеют отношение к чисто теоретическим исследованиям, а три последние более связаны с практической агрономией. Долгое время среди специалистов господствовала негласная уверенность, что по-настоящему качественная процесс-ориентированная модель может успешно применяться для достижения всех пяти целей. Однако уже в конце XX века на этот счет высказывались сомнения (7), а за последние 20 лет сформировалось прямо противоположное представление. Во многих публикациях повторяется тезис о том, что универсальной математической модели, одинаково пригодной как для теоретических исследований, так и для практических расчетов и прогнозов в широком временном и пространственном масштабе, не просто не существует, но ее в принципе невозможно создать. Поэтому правильная стратегия заключается не в постоянном усовершенствовании какой-то одной модельной платформы с целью получения универсального расчетного инструмента, а в создании специфических узко ориентированных решений для каждой конкретной проблемы — моделировании для конкретного случая (*ad hoc modeling*) (8).

В общемировой практике полезность большинства созданных сложных базовых моделей для задач сельскохозяйственного производства (системы поддержки технологических решений, оперативный прогноз урожайности, массовые расчеты потенциальной продуктивности территорий) оказалась весьма невысока (9-11). Органы планирования и управления пользуются зарекомендовавшими себя простыми эмпирическими моделями (агрометеорологическими прогнозами) ожидаемой урожайности основных культур, а привлечение спутниковых снимков и других данных дистанционного зондирования, по-видимому, окончательно снимает вопрос о дополнительном применении такого сложного инструментария, как процесс-ориентированные имитационные модели. В точном земледелии их использование тоже не получило пока достаточного развития: число и разнообразие факторов внутриполевой неоднородности значительно превышает функциональные возможности даже самых продвинутых современных моделей. Более того, реальная степень варибельности определяющих показателей, формально отраженных в большинстве моделей (водный стресс, азотное питание и т.д.), зачастую ниже порога чувствительности модельных алгоритмов, поэтому здесь чаще применяются статистические модели (11). То есть для агрономической практики в подавляющем большинстве случаев процесс-ориентированные модели оказываются ничем не лучше эмпирических аналогов.

Востребованной сферой применения имитационных моделей может стать теоретическая наука, конкретно — теоретическая сельскохозяйственная биология. До сих пор большинство биологов (если речь не идет о биоинформатике и исследовании генома на молекулярном уровне) скептически относятся к компьютерным экспериментам как средству познания и интерпретации наблюдаемых явлений. У них вызывает сомнение возможность получения принципиально нового знания из модели, в которую зало-

жены только известные факты и закономерности. Однако для процессориентированных моделей подобное верно лишь отчасти. При исследовании истинно наукоемких моделей могут быть выявлены новые феномены или найдено оригинальное объяснение наблюдаемых в природе явлений, а сами такие модели могут служить самоценным научным инструментом и эффективной заменой полевого или лабораторного опыта. Ниже мы подтвердим этот тезис примерами нескольких мини-открытий и объясняющих гипотез, полученных нами в компьютерных экспериментах с моделями собственной разработки. Прежде всего к ним следует отнести эмерджентные (то есть не заложенные в модель явным образом) неожиданные эффекты, проявляющиеся в результатах и неявно вытекающие из достаточно простых исходных посылок с видимой физической интерпретацией. В последнее время перспективной и активно разрабатываемой областью применения динамических моделей также становится ускоренная селекция.

Имитационная модель как инструмент выдвигания гипотез и интерпретации явлений. *Модельная интерпретация аномальных форм функции продуктивности.* Одной из наиболее известных классических проблем агрохимии, обсуждаемых более 150 лет, но сохраняющих актуальность, остается нахождение и формализация функции отклика продуктивности культур на воздействие внешних факторов, в частности на дозы вносимых удобрений (5). Чаще всего в качестве аппроксимации этой зависимости используются гладкие одномодальные кривые или кривые с насыщением, что полностью отвечает базовым представлениям об эффективности возрастающих доз экологических факторов (законы Либиха и Шелфорда). Вместе с тем в открытых источниках можно неоднократно встретить упоминание о случаях, когда обработка полученных экспериментальных данных приводила к выявлению более сложной и, главное, немонотонной формы эмпирической функции продуктивности (здесь и далее речь будет идти только о влиянии азотных удобрений). В области средних значений влияющего фактора проявляется тенденция к выходу функции отклика на промежуточное плато или даже возникает промежуточный провал, а для вариантов с увеличенными дозами снова наблюдается повышение урожайности согласно ожидаемой стандартной тенденции (12-16).

Дать простое и однозначное объяснение эффекта промежуточного плато или промежуточного провала отнюдь не просто. В инициированном авторами статьи совместном исследовании была предпринята попытка использовать расчеты по альтернативным динамическим моделям продукционного процесса яровой пшеницы AGROTOOL (17) и озимой пшеницы AGROSIM (5) с целью выявить описанный эффект и дать ему модельную интерпретацию. Это удалось сделать для обеих моделей (рис. 1), причем объяснение немонотонности полученной функции продуктивности оказалось различным, хотя необходимые условия воспроизводимости описанного случая для обеих моделей были схожими (наличие засухи, то есть стрессового периода развития растения в сроки, предшествующие цветению) (17). Принципиальным фактором в модели AGROSIM, разработанной специалистами Leibniz-Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF, Германия), выступала частичная транслокация структурной биомассы корней и побега для обеспечения энергетических расходов на дыхание поддержания. Подобный феномен наблюдается в модели только для средних доз предпосевного внесения удобрений, поскольку при низких дозах малая величина структурной биомассы, накопленной к началу периода стресса, не формирует критических запросов на дыхание поддержания, а для больших доз эти запросы покрываются имеющимся пулом запасных

углеводов. В модели AGROTOOL тот же эффект неявно вытекает из реализованной в ней формализации процессов углеродно-азотного взаимодействия в растении (18).

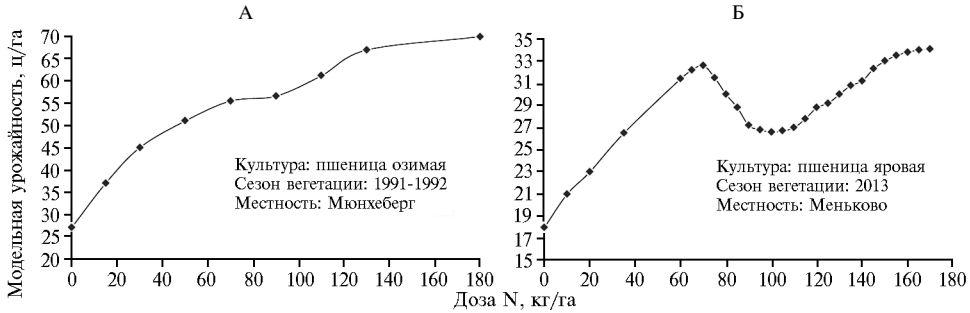


Рис. 1. Модельные функции продуктивности пшеницы в зависимости от дозы азотных удобрений с эффектом «промежуточного плато»: А — модель AGROSIM (Leibniz-Centre for Agricultural Landscape Research, Германия), Б — AGROTOOL (Агрофизический институт, Россия).

В соответствии с предложенным методом моделирования (6), механизм, регулирующий распределение первичных ассимилятов между побегом и корнем (ростовые функции), представляет собой адаптивный алгоритм, обеспечивающий сбалансированный, то есть наиболее эффективный рост органов, генерирующих основные субстраты синтеза структурного вещества (N и C) на вегетативной стадии онтогенеза в двухпоточной схеме с пулами запасных метаболитов.

Эффекты тайминга и микродозинга при управлении азотными подкормками. При расчетах по модели AGROTOOL с целью нахождения оптимальных сроков и доз азотных подкормок по листу при возделывании яровой пшеницы интенсивного сорта Дарья на тестовых площадках Менковского филиала Агрофизического института были получены нетривиальные и неожиданные результаты. Вычислительные эксперименты в ряде случаев продемонстрировали необычайно высокую чувствительность модели к срокам вноса некорневых подкормок. Так, оказалось, что при определенных условиях задержка на 3-5 сут относительно опорной даты подкормки способна снизить урожайность до 60 % от максимально возможной, тогда как при условии «угадывания» срока подкормки модельная урожайность резко повышалась по сравнению с контрольным вариантом даже при сравнительно незначительных (малых) дозах действующего вещества. Подобные результаты можно было бы списать на несовершенство модели, но такое ее поведение вполне согласуется с достаточно широко известными и опубликованными данными реальных полевых опытов (10, 11, 19), подтверждающими значительные эффекты срока подкормок на конечный урожай (тайминг) и возможность существенно влиять на его величину малыми дозами удобрений (микродозинг).

Наличие модели, то есть возможность проследить за ростом и развитием модельного растения «в режиме отладки», позволило понять причины описанных явлений на алгоритмическом уровне. Так, проведенные исследования привели к выводу о том, что эффект тайминга (например, резкое падение конечной продуктивности при выборе неудачной даты подкормки) действительно воспроизводится в модели при определенном сочетании нескольких специфических условий (в частности, при наличии незначительного, но обязательного дефицита азота в почве в течение всей стадии вегетативного роста). Детальный анализ показал, что получаемые результаты могут быть интерпретированы и естественным образом вытекают из простых допущений, заложенных в подмодель углеродно-азотного

взаимодействия (6, 18). При этом азотные подкормки до цветения имеют не только количественный, но и качественный эффект, оказывая регуляторное влияние на процессы роста, которое может быть как существенно положительным, так и резко негативным.

Совместное воздействие водного и азотного стресса. Специалистам практического растениеводства хорошо известно, что при плохой влагообеспеченности, то есть в условиях засухи, внесение значительных доз минеральных удобрений может приводить к обратному эффекту и негативно влиять на конечную продуктивность посева. Этот факт может быть воспроизведен в компьютерных экспериментах с механистическими моделями агроэкосистемы, даже если в них не заложено никаких специальных нелинейных зависимостей и механизмов совместного влияния водно-

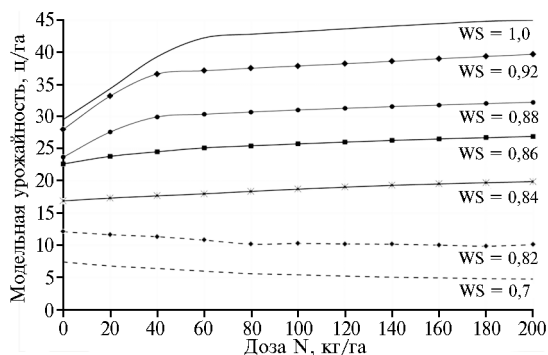


Рис. 2. Эффект совместного влияния водного и азотного стресса на яровую пшеницу (данные расчетов по модели AGROTOOL): WS — показатель влагообеспеченности.

го и азотного стресса, а также полностью игнорируется описание солевого статуса растения. Так, указанную закономерность получили при обработке результатов модельных расчетов в проекте по анализу и сравнению чувствительности двух альтернативных моделей — AGROTOOL (17) и MONICA (20) к одновременному и раздельному влиянию засухи и азотного дефицита. Для этого был спланирован и осуществлен многофакторный компьютерный эксперимент в системе APEX — специальной

управляющей оболочке для автоматизации многовариантных расчетов в моделях продукционного процесса сельскохозяйственных культур (4). Управление параметрами водного стресса осуществлялось с использованием реализованного в модели AGROTOOL модуля имитации системы автоматического орошения (18). Пример полученных результатов (рис. 2) демонстрирует, что графики функции отклика (зависимость хозяйственного урожая от предпосевной дозы азотных удобрений для разной условной влагообеспеченности) оказываются не подобны, не эквидистантны и, более того, принципиально различаются. Так, в условиях сильного стресса по влаге конечная продуктивность посева не растет, а падает при увеличении дозы предпосевного внесения азота. Детальное исследование модельных алгоритмов позволяет объяснить наблюдаемый эффект в рамках основной используемой гипотезы двухпоточной C-N регуляции в растении и заложенных в модель механизмов вычисления глубины проникновения корней в зависимости от содержания влаги в почвенном профиле.

Перспективы использования имитационных моделей в информационном обеспечении селекции. Трудно указать более консервативную область сельскохозяйственной биологии, чем селекция. Особенно кардинальным кажется существующий разрыв между поточно-балансовым подходом к описанию физиологических процессов у растений, принятым во всех классических моделях агроэкосистем, и методами селекции, основанными на анализе количественных признаков на генетическом уровне. Тем не менее, по мере того, как традиционная сельскохозяйственная генетика сталкивается с необходимостью адекватного ответа на современные вызовы, комплексные математические модели продукцион-

ного процесса начинают всерьез рассматриваться как инструмент теоретических исследований. Большинство таких вызовов связаны с наблюдаемыми глобальными изменениями, в первую очередь с изменениями климата (21). Уже практически никем не оспаривается ожидание существенного повышения неустойчивости будущих урожаев из-за роста частоты и интенсивности экстремальных явлений (таких как температурный стресс и засухи). Ответом может быть создание принципиально новых сортов культур, в первую очередь зерновых (22). Одним из неожиданных, но мощных средств ускорения традиционной селекции может служить инструментарий имитационного моделирования агроэкосистем (23). Эти исследования связаны с понятием идеотипа (24, 25), или идеального сорта, как принято в отечественной литературе (26). Идеотип — умозрительный будущий сорт, способный давать теоретически возможный урожай в соответствии с биоклиматическим потенциалом (по существу, потенциальная цель селекции).

Качественные оценки перспектив идеального сорта для научного прогноза состояния растения и его отдельных признаков при выращивании в заданных условиях показали свою работоспособность (27, 28), однако все преимущества такого подхода могут раскрыться только в сочетании с использованием имитационных моделей агроэкологии. При этом генотипическая адаптация, которая предполагает включение новых признаков в сорт, как ожидается, будет одним из самых важных элементов в стратегиях реакции на будущее изменение климата, а моделирование агроэкосистем может служить основой для оценки биофизического потенциала культур, обеспечивающего такую адаптацию (29). В целом можно говорить о двух трендах, которые сформировались в современных исследованиях в области применения моделей агроэкосистем в сельскохозяйственной экологии и селекции. Это определение зон, благоприятных для уже существующих сортов с учетом значительной динамичности вследствие климатических изменений, и обоснование требований к признакам новых сортов, адаптированных к ожидаемым условиям возделывания.

Первое направление иллюстрируют работы (30, 31), в которых, в частности, показано, что определенные генотипы ячменя могут быть перспективными для прогнозируемого изменения климата, причем авторы предложили наиболее благоприятные зоны для конкретных идеотипов, обладающих комбинацией нескольких ключевых генетических признаков (фенология, рост листьев, фотосинтез, засухоустойчивость и формирование зерновки). R.P. Rötter с соавт. (29) проанализировали исследования, отражающие второй тренд. В их обзоре рассмотрены основные ограничения и пределы использования имитационного моделирования для поддержки селекции сельскохозяйственных культур, а также представлены примеры оценки и формирования сортов зерновых для ожидаемых условий с помощью моделирования. Модели агроэкосистем применяются для идентификации признаков, необходимых для будущих сортов (32). В западном научном сообществе использование имитационных моделей для ускорения селекционного процесса уже перешло в практическую плоскость. На основе углубленной биологизации существующих моделей начаты работы по их адаптации для новых сфер применения. В России это направление также следует активизировать.

Таким образом, несмотря на определенные объективные ограничения для практической агрономии, имитационная модель агроэкосистемы может и должна рассматриваться как реальный инструмент формализации знаний о процессах и явлениях, определяющих рост и развитие культурных растений. Более того, модели продукционного процесса помогают

исследователям в области сельскохозяйственной биологии ускорять переход от пассивного получения и накопления данных о растениях к активному управлению знаниями о процессах и явлениях в агроэкосистемах (33-36). На международном симпозиуме «Crop Modelling for Agriculture and Food Security under Global Change» (Берлин, 2016 год) были четко обозначены достижения, поставлены конкретные цели и определены перспективы применения имитационного моделирования в сельскохозяйственной биологии. Отмечалось, что модели могут быть локомотивом прогресса в улучшении сельскохозяйственных культур, представляя собой уникальный инструмент анализа и выявления благоприятных комбинаций генотипов (G, genotype) и методов управления (M, management) для конкретных почвенно-климатических условий (E, environment) с учетом имеющихся ресурсов (37). Только моделирование позволяет эффективно проанализировать полный спектр комбинаций $G \times M \times E$ и обеспечивает рациональную основу для разработки и испытания новых идеотипов пшеницы, оптимизированных для целевых агроландшафтов и будущих климатических условий. Следующие поколения моделей должны включать так называемые генетические коэффициенты для моделирования различий между гибридами (gene-based crop model) (38). Геномное прогнозирование с помощью моделей сельскохозяйственных культур способно работать лучше, чем статистические методы с использованием только данных по генетике (39). Основное направление развития моделей связано с улучшением взаимодействия $G \times M \times E$.

Итак, ожидается, что существенная биологизация будет в основном определять развитие механистических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Более того, мы полагаем, что в рамках этого направления результаты любых полевых опытов должны применяться только для идентификации моделей, а не для их построения. При этом в первую очередь следует использовать гипотезы о сущности и движущей силе биологических процессов в растении. При реализации такого идеального плана модель превращается в инструмент получения новых знаний для исследования реакции агроэкосистемы на все возможные воздействия, включая те, которые пока нельзя воспроизвести в полевом опыте (например, связанные с изменениями климата).

¹ФГБНУ *Агрофизический научно-исследовательский институт*, Поступила в редакцию
195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, 28 марта 2017 года
e-mail: vbadenko@gmail.com, alex.topaj@gmail.com, mail@agrophys.com;
²*Leibniz-Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF)*,
15374 Müncheberg, Eberswalder Str. 84, Germany,
e-mail: wmirschel@zalf.de, Claas.Nendel@zalf.de

Sel'skokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2017, V. 52, № 3, pp. 437-445

CROP MODELS AS RESEARCH AND INTERPRETATIVE TOOLS

V.L. Badenko¹, A.G. Topaj¹, V.V. Yakushev¹, W. Mirschel², C. Nendel²

¹*Agrophysical Research Institute*, Federal Agency of Scientific Organizations, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail vbadenko@gmail.com (corresponding author), alex.topaj@gmail.com, mail@agrophys.com;

²*Leibniz-Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF)*, 15374 Müncheberg, Eberswalder Str. 84, Germany, e-mail wmirschel@zalf.de, Claas.Nendel@zalf.de

ORCID:

Badenko V.L. orcid.org/0000-0002-3054-1786

Mirschel W. orcid.org/0000-0002-3620-3171

Topaj A.G. orcid.org/0000-0002-0412-2385

Nendel C. orcid.org/0000-0001-7608-9097

Yakushev V.V. orcid.org/0000-0001-8434-5580

The authors declare no conflict of interests

Received March 28, 2017

doi: 10.15389/agrobiol.2017.3.437eng

Abstract

Mechanistic (eco-physiological), or process-oriented, approach to simulation modeling of

the production process of plants assumes considering the essences of processes and cause-effect relationships in the agroecosystem with a description of their dynamics based on physically interpreted dependencies (as opposed to logically interpreted dependencies at the empirical approach) (A. Di Paola et al., 2016; R.A. Poluektov, 2010). The analysis of the possible use of dynamic simulation models of agro-ecosystems in the mechanistic nature of applied and theoretical research of agricultural biology is presented. The current practice of the development and usage of these models shows their highest suitability for research purposes in comparison to the potential usefulness and relevance to the practical problems of agronomy. Specific examples of model applications demonstrate the possibility of computer-based model experiments to get nontrivial results, which are not directly incorporated into the logic of the model algorithms (V. Badenko et al., 2014; S. Medvedev et al., 2015). The role of simulation model as a tool of obtaining new knowledge and interpretation of the empirically observed phenomena has been showed. To demonstrate the potentials of simulation models for agricultural biology, some results of authors' studies have been reviewed, including analyze of the appearance of a non-monotonic response function of crop yield on the doses of nitrogen fertilizer, the results of computer experiments on interpretation of the effect of the time delay during management of nitrogen feeding «on the leaf», and the joint impact of combined water and nitrogen stresses. Based on analysis of recent publications, conclusions of perspectives of models application to accelerate the plant breeding process were justified. It is concluded, i) further «biologization» of existing models is a prerequisite for a successful development of the dynamic crop growth modeling, and ii) it is necessary to increase the level of scientific validity of model approaches, which are used to describe the biotic processes in the soil—plant—atmosphere system.

Keywords: agro-ecosystems simulation model, crop production process, mechanistic approach, ideotype, plant breeding, breeding, G×E×M-oriented models.

REFERENCES

1. Di Paola A., Valentini R., Santini M. An overview of available crop growth and yield models for studies and assessments in agriculture. *J. Sci. Food Agr.*, 2016, 96(3): 709-714 (doi: 10.1002/jsfa.7359).
2. Poluektov R.A. *Materialy Vserossiiskoi konerentsii «Matematische modely i informatsionnyye tekhnologii v sel'skokhozyaistvennoi biologii: itogi i perspektivy»*. [Proc. Conf. «Mathematical modeling and IT in agricultural biology: advances and perspectives». St. Petersburg, 2010: 9-13 (in Russ.).
3. Frans D., Tornli D. *Matematische modely v sel'skom khozyaistve* [Mathematical modeling in agriculture]. Moscow, 1987 (in Russ.).
4. Medvedev S., Topaj A. Crop simulation model registrator and polyvariant analysis. In: *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, V. 359: 295-301 (doi: 10.1007/978-3-642-22285-6_32).
5. Mirschel W., Wenkel K.O. Modelling soil—crop interactions with AGROSIM model family In: *Modelling water and nutrient dynamics in soil—crop systems*. Springer Netherlands, 2007: 59-73 (doi: 10.1007/978-1-4020-4479-3_6).
6. Poluektov R.A. *Dinamicheskie modely agroekosistemy* [Dynamic models of agroecosystem]. Leningrad, 1991 (in Russ.).
7. Sinclair T.M., Seligman N.G. Crop modelling: From infancy to maturity. *Agron. J.*, 1996, 88: 698-704 (doi: 10.2134/agronj1996.00021962008800050004x).
8. Affholder F., Titonell P., Corbeels M., Roux S., Motisi N., Tixier P., Wery J. Ad hoc modeling in agronomy: what have we learned in the last 15 years? *Agron. J.*, 2012, 104: 735-748 (doi: 10.2134/agronj2011.0376).
9. Marin F., Jones J.W., Boote K.J. A stochastic method for crop models: including uncertainty in a sugarcane model. *Agron. J.*, 2017, 109(2): 483-495 (doi: 10.2134/agronj2016.02.0103).
10. Topazh A.G. V sbornike: *Matematische modely prirodnykh i antropogennykh ekosistem* [In: Mathematical models of natural and anthropogenic ecosystems]. St. Petersburg, 2014: 48-69 (in Russ.).
11. Yakushev V.V. *Tochnoe zemledelie: teoriya i praktika* [Precision agriculture: fundamental and practical aspects]. St. Petersburg, 2016 (in Russ.).
12. Montemurro F., Convertini G., Ferri D. Nitrogen application in winter wheat grown in Mediterranean conditions: effects on nitrogen uptake, utilization efficiency, and soil nitrogen deficit. *J. Plant Nutr.*, 2007, 30(10): 1681-1703 (doi: 10.1080/01904160701615541).
13. Maphosa L., Langridge P., Taylor H., Emebiri L., Mather D. Genetic control of grain protein, dough rheology traits and loaf traits in a bread wheat population grown in three environments. *J. Cereal Sci.*, 2015, 64: 147-152 (doi: 10.1016/j.jcs.2015.05.010).
14. Tumusiime E., Brorsen B.W., Mosali J., Johnson J., Locke J., Biermacher J.T. Determining optimal levels of nitrogen fertilizer using random parameter models. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 2011, 43(4): 541-552 (doi: 10.1017/S107407080000067).
15. Boldea M., Sala F., Rawashdeh H., Luchian D. Evaluation of agricultural yield in relation to the doses of mineral fertilizers. *Journal of Central European Agriculture*, 2015,

- 16(2): 149-161 (doi: 10.5513/JCEA01/16.2.1603).
16. Malone R.W., Kersebaum K.C., Kaspar T.C., Ma L., Jaynes D.B., Gillette K. Winter rye as a cover crop reduces nitrate loss to subsurface drainage as simulated by HERMES. *Agr. Water Manage.*, 2017, 184: 156-169 (doi: 10.1016/j.agwat.2017.01.016).
 17. Badenko V., Terleev V., Topaj A. AGROTOOL software as an intellectual core of decision support systems in computer aided agriculture. *Appl. Mech. Mater.*, 2014, 635-637: 1688-1691 (doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.1688).
 18. Medvedev S., Topaj A., Badenko V., Terleev V. Medium-term analysis of agroecosystem sustainability under different land use practices by means of dynamic crop simulation. In: *IFIP Advances in information and communication technology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015, V. 448: 252-261 (doi: 10.1007/978-3-319-15994-2_25).
 19. Leinikh P.A. *Materialy reg. soveshchaniya nauchn. uchrezhdenii — uchastnikov Geoseti Severo-Vostochnogo i Ural'skogo regionov* [Proc. of North-East and Ural Geonet Workshop, Russia]. Perm', 2013: 51-54 (in Russ.).
 20. Nendel C., Berg M., Kersebaum K.C., Mirschel W., Specka X., Wegeh-enkel M., Wenkel K.O., Wieland R. The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecological Modeling*, 2007, 222(9): 1614-1625 (doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.02.018).
 21. Lobell D.B., Schlenker W., Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 2011, 333: 616-620 (doi: 10.1126/science.1204531).
 22. Zhuchenko A.A. Present and future of adaptive selection and seed breeding based on identification and systematization of plant genetic resources. *Agricultural Biology*, 2012, 5: 3-19 (doi: 10.15389/agrobiology.2012.5.3rus) (in Russ.).
 23. Kissoudis Ch., van de Wiel C., Visser R.G., van der Linden G. Future-proof crops: challenges and strategies for climate resilience improvement. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2016, 30: 47-56 (doi: 10.1016/j.pbi.2016.01.005).
 24. Novoselov S.N. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2006, 24: 308-319 (in Russ.).
 25. Suriharn B., Patanothai A., Boote K.J., Hoogenboom G. Designing a peanut ideotype for a target environment using the CSM-CROPGRO-Peanut Model. *Crop Sci.*, 2011, 51(5): 1887-1902 (doi: 10.2135/cropsci2010.08.0457).
 26. Spitsyn I.I., Spitsyn D.I. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2003, 8(1): 78-79 (in Russ.).
 27. Kornilov B.B., Dolmatov E.A. *Selektsiya i sortorazvedenie sadovykh kul'tur*, 2016, 3: 71-74 (in Russ.).
 28. Ramirez-Villegas J., Watson J., Challinor A.J. Identifying traits for genotypic adaptation using crop models. *J. Exp. Bot.*, 2015, 66(12): 3451-3462 (doi: 10.1093/jxb/erv014).
 29. Rötter R.P., Tao F., Höhn J.G., Palosuo T. Use of crop simulation modelling to aid ideotype design of future cereal cultivars. *J. Exp. Bot.*, 2015, 66(12): 3463-3476 (doi: 10.1093/jxb/erv098).
 30. Jeuffroy M.-H., Casadebaig P., Debaeke P., Loyce C., Meynard J.-M. Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 2014, 34(1): 121-137 (doi: 10.1007/s13593-013-0170-9).
 31. Nendel C., Kersebaum K.C., Mirschel W., Wenkel K.O. Testing farm management options as climate change adaptation strategies using the MONICA model. *Eur. J. Agron.*, 2014, 52: 47-56 (doi: 10.1016/j.eja.2012.09.005).
 32. Semenov M.A., Stratonovitch P. Adapting wheat ideotypes for climate change: Accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Clim. Res.*, 2015, 65: 123-139 (doi: 10.3354/cr01297).
 33. Angulo C., Rötter R., Lock R., Enders A., Fronzek S., Ewert F. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. *Agr. Forest Meteorol.*, 2013, 170: 32-46 (doi: 10.1016/j.agrformet.2012.11.017).
 34. Badenko V., Kurtener D., Yakushev V., Torbert A., Badenko G. Evaluation of current state of agricultural land using problem-oriented fuzzy indicators in GIS environment. *Lect. Notes Comput. Sc.*, 2016, 9788: 57-69 (doi: 10.1007/978-3-319-42111-7_6).
 35. Biernath C., Gayler S., Bittner S., Klein C., Högy P., Fangmeier A., Priesack E. Evaluating the ability of four crop models to predict different environmental impacts on spring wheat grown in open-top chambers. *Eur. J. Agron.*, 2011, 35(2): 71-82 (doi: 10.1016/j.eja.2011.04.001).
 36. Specka X., Nendel C., Wieland R. Analysing the parameter sensitivity of the agroecosystem model MONICA for different crops. *European Journal of Agronomy*, 2015, 71: 73-87 (doi: 10.1016/j.eja.2015.08.004).
 37. Hammer G.L., McLean G., Chapman S., Zheng B., Doherty A., Harrison M.T., Van Oosterom E., Jordan D. Crop design for specific adaptation in variable dryland production environments. *Crop and Pasture Science*, 2014, 65(7): 614-626 (doi: 10.1071/CP14088).
 38. Technow F., Messina C.D., Totir L.R., Coope M. Integrating crop growth models with whole genome prediction. *PLoS ONE*, 2015, 10(6): e0130855 (doi: 10.1371/journal.pone.0130855).
 39. Hoogenboom G., White J.W., Messina C.D. From genome to crop: integration through simulation modeling. *Field Crops Res.*, 2004, 90: 145-163 (doi: 10.1016/j.fcr.2004.07.014).