



Российский фонд фундаментальных исследований

Южный федеральный университет  
Институт математики, механики  
и компьютерных наук им. Воровича И.И.

Российская академия наук  
Южный научный центр  
Институт аридных зон

# ЭКОЛОГИЯ ЭКОНОМИКА ИНФОРМАТИКА

## ТОМ 2

Ростов-на-Дону  
2015

**РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ, МЕХАНИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК  
ИМ. ВОРОВИЧА И.И.  
ИНСТИТУТ АРИДНЫХ ЗОН  
ЮЖНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**ЭКОЛОГИЯ  
ЭКОНОМИКА  
ИНФОРМАТИКА**

**Том 2**

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Сборник статей

**Ростов-на-Дону  
2015**

УДК 502.3  
ББК 20.1+20.18  
С 34

Рецензенты

д.г.н. Бердников С.В., д.ф.-м.н. Тютюнов Ю.В.

Редакционная коллегия:

- Матишов Г.Г.** – *главный редактор, Председатель Южного научного центра РАН*
- Боровская М.А.** – *ректор Южного федерального университета*
- Матишов Д.Г.** – *директор Института аридных зон Южного научного центра РАН*
- Сурков Ф.А.** – *зав. кафедрой глобальных информационных систем, Южный федеральный университет*
- Базелюк А.А.** – *заместитель начальника Департамента Росгидромета по ЮФО и СКФО*
- Архипова О.Е.** – *зам. директора Института аридных зон Южного научного центра РАН*
- Селютин В.В.** – *зав. лабораторией Института математики, механики и компьютерных наук им. Воровича И.И. Южного федерального университета*

- С-34 **Экология, экономика, информатика.** Сборник статей: в 3 т. – Ростов-на-Дону Издательство Южного федерального университета, 2015.  
ISBN 978-5-9275-1642-1  
Т. 2: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем, 2015. – 432 с.  
ISBN 978-5-9275-1644-5 (Т.2)

Публикуется в авторской редакции

В сборнике представлены статьи ведущих ученых и молодых специалистов, посвященные современным подходам к системным исследованиям и математическому моделированию экономических, экологических и эколого-экономических систем, а также вопросам рационального использования природных ресурсов.

Публикуется в авторской редакции.

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 15-07-20612 Г*

ISBN 978-5-9275-1644-5 (Т.2)  
ISBN 978-5-9275-1642-1

УДК 502.3  
ББК 20.1+20.18

© Южный федеральный университет, 2015  
© Институт аридных зон, 2015  
© Южный научный центр РАН, 2015

**RUSSIAN FOUNDATION FOR BASIC RESEARCH  
SOUTHERN FEDERAL UNIVERSITY  
INSTITUTE OF ARID ZONE  
SOUTHERN SCIENTIFIC CENTER OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

**ECOLOGY  
ECONOMY  
INFORMATICS**

**SYSTEM ANALYSIS AND MATHEMATICAL  
MODELING OF ECOLOGICAL  
AND ECONOMIC SYSTEMS**

**Volume 2**

Collection of articles

**Rostov on Don  
2015**

**UDC 502.3**  
**E 34**

Reviewers:

Dr.Sci (Geography) Berdnikov S.V., Dr.Sci (Physics and Mathematics)  
Tyutyunov Yu.V.

Editors:

*Academician of RAS Matishov G.G. – Chief Editor*

*Dr. Sci (Economy) Borovskaya M.A.*

*Corresponding member of RAS Matishov D.G.*

*PhD Surkov F.A.*

*PhD Bazeluk A.A.*

*PhD Arkhipova O.E*

*PhD Selutin V.V.*

**C-34**            **ECOLOGY ECONOMY INFORMATICS**  
**SYSTEM ANALYSIS AND MATHEMATICAL MODELING OF**  
**ECOLOGICAL AND ECONOMIC SYSTEMS**

Rostov on Don: Southern federal university Publishers, 2015, Vol.1-2/

Volume 2 - 432 p.

ISBN 978-5-9275-1642-1

ISBN 978-5-9275-1644-5 (T.2)

The collection contains articles by leading experts and young scientists dedicated to geographic information technologies, space monitoring and research in the area of environmental development, aimed at the solution of problems of environmental protection and ecological safety in the new technological level on modern approaches to system research and mathematical modeling of economic, systems, as well as the rational use of natural resources.

*The publication was supported by the Russian Foundation for Basic Research  
project 15-07-20612 G*

**ISBN 978-5-9275-1644-5 (T.2)**

**ISBN 978-5-9275-1642-1**

**UDC 502.3**

© Southern Federal University , 2015  
© Institute of Arid Zones , 2015  
© Southern Scientific Center o,  
Russian Academy of Sciences, 2015

**Список литературы:**

1. Угольницкий Г.А. Иерархическое управление устойчивым развитием. М.: Издательство физико-математической литературы, 2010. 336 с.
2. Приказ Росрыболовства № 20 "Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения" от 18.01.2010.
3. Лесин В. В., Лисовец Ю. П. Основы методов оптимизации. М.: МАИ, 1998. 344 с.
4. Угольницкий Г.А., Усов А.Б. Равновесия иерархически организованных динамических систем управления с учетом требования устойчивого развития // Автоматика и телемеханика. 2014. № 6. С. 86–102.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДЫ ПОЛИВАРИАНТНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АГРОЭКОСИСТЕМЫ «АРЕХ» ДЛЯ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В АГРОЭКОЛОГИИ**

Топаж<sup>а</sup> А.Г., Медведев<sup>а</sup> С.А., Захарова<sup>а</sup> Е.Т., Хлавинка<sup>б</sup> П.

<sup>а</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург  
alex.topaj@gmail.com, glorguin@yandex.ru, elenazaharova.afi@gmail.com

<sup>б</sup>Институт Агросистем и Биоклиматологии, Университет им. Менделя, Брно, Чехия  
petr.hlavinka@mendelu.cz

**Введение**

Компьютерные имитационные модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур с течением времени завоевывают все большее признание не только как вспомогательные инструменты научного исследования в агроэкологии, но и как прикладные наукоемкие технологии в традиционной практике растениеводства. Особенно значимой становится их роль в качестве интеллектуального ядра компьютерных систем поддержки агротехнологических решений в новых перспективных трендах развития сельскохозяйственной отрасли – адаптивно-ландшафтного, устойчивого и точного земледелия.

С формальной математической точки зрения имитационная динамическая модель агроэкологии представляет собой рекуррентный алгоритм

$$\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{w}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{a}); \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0; k = 0, 1, 2 \dots T, \quad (1)$$

где  $k$  – временной шаг модели,  $\mathbf{x}(k)$ ,  $\mathbf{x}(k+1)$  – вектор переменных состояния модели в два смежных момента времени;  $\mathbf{w}(k)$  – вектор неконтролируемых внешних воздействий;  $\mathbf{u}(k)$  – вектор контролируемых внешних воздействий;  $\mathbf{a}$  – вектор параметров модели;  $T$  – временной интервал моделирования. С помощью этого алгоритма можно по исходным данным о внешних факторах (погода  $\mathbf{w}$  и агротехника  $\mathbf{u}$ ) рассчитать динамику сельскохозяйственного посева в течение всего сезона вегетации – от сева до уборки и интерпретировать полученные результаты в терминах содержательных показателей – урожая, сроков наступления фаз и других индикаторов роста и развития растений.

Использование модельных расчетов (мониторинг состояния виртуального посева под воздействием тех или иных управляющих воздействий в компьютерном эксперименте) позволяет существенно упростить анализ множества альтернативных решений и выбор оптимальных агротехнологий по сравнению с традиционным подходом, основанном на многолетних полевых опытах.

В классических трудах основоположников концепции «программирования урожая» в СССР предложена классификация задач или уровней управления в земледелии по временной шкале, то есть исходя из временного интервала, на котором сказываются последствия принимаемых решений. Выделяются три таких уровня - *проектный*, *плановый* и *оперативный* [1].

К *проектному* уровню относятся задачи, возникающие в связи с внедрением новых культур и агротехнологий, строительством крупномасштабных мелиоративных сооружений, изменением структуры посевных площадей, введением в практику новых схем севооборота или систем применения технологических операций и т.д. Во всех этих случаях последствия однажды принятых решений сказываются на протяжении многих лет, зачастую – десятилетий, а центральной научной проблемой является прогнозирование долгосрочной динамики элементов почвенного плодородия и анализ возможных изменений состояния природной среды под антропогенной нагрузкой.

Основной задачей управления земледелием на *плановом* уровне является поддержка принятия решений, то есть разработка оптимальной технологии получения урожая в пространственном масштабе сельскохозяйственного поля и временном масштабе одного вегетационного периода. Вектор интереса при этом смещается от экологического к хозяйственному критерию. Последствия принятых плановых решений сказываются, главным образом, на протяжении текущего года, хотя определенное последствие может иметь место и на более длительных временных интервалах.

*Оперативный* уровень охватывает решения, которые принимаются непосредственно в ходе вегетации и обеспечивают адаптацию плановой агротехнологии к реальной обстановке на данном сельскохозяйственном поле. То есть, речь идет об оперативном управлении процессом формирования урожая. Последствия решений, принимаемых на оперативном уровне, обычно проявляются на достаточно коротких временных интервалах от дней или даже часов до недель и месяцев, вплоть до конца вегетации.

С момента появления компьютерных динамических моделей агроэкосистем традиционной сферой их приложения в практическом растениеводстве служили задачи планового и оперативного уровня. Действительно, сама структура модели предполагает, что расчет производится для конкретных, четко определенных почвенных и метеорологических условий, технологий выращивания и начальных условий. То есть для строго специфицированного варианта задания всех составляющих эволюционного оператора (1). Наоборот, задачи проектного уровня, часто относимые к предметной области землеустройства, как правило, решаются с привлечением упрощенных регрессионных экономико–статистических моделей. Однако ясно, что при таком подходе влияние большинства климатических, физических,

технологических и других факторов просто игнорируется, и результаты анализа оказываются полученными в условиях критической неопределенности входных данных. В связи с этим, крайне перспективной выглядит идея расширения сферы применимости имитационных моделей продукционного процесса растений на задачи средне- и долгосрочного планирования. Преимущества динамического подхода в данном случае очевидны:

- повышение точности и адекватности расчетов благодаря учету большего количества факторов,
- многовариантность расчетов, обуславливаемая широким набором возможностей по варьированию входных данных,
- получение результатов в виде распределений показателей на вероятностных выборках внешних условий с выходом на анализ рисков,
- неограниченное расширение числа отслеживаемых в модели показателей состояния агроэкосистемы (продуктивность, экология, плодородие и пр.)
- снижение степени неопределенности модельных расчетов и т.д.

Однако методология использования динамических моделей в решениях проектного уровня в настоящее время практически отсутствует, а примеры применения подобных моделей для проведения долгосрочных расчетов единичны. Во многом это объясняется необходимостью значительной адаптации как самих моделей, так и инфраструктуры компьютерных экспериментов под требования соответствующих задач.

Модификация внутренней логики моделей продукционного процесса диктуется двумя обстоятельствами: необходимостью полноценного описания смены культур в многолетнем хозяйственном севообороте и адекватного учета разнообразных агромелиоративных мероприятий пролонгированного срока действия. В частности, из первого соображения вытекает требование универсального характера модели. Иными словами, необходимо использовать единую модель имитации динамики продукционного процесса для широкого спектра сельскохозяйственных культур различных типов (яровых и озимых, зерновых и кормовых, однолетних и многолетних, традиционных и энергетических). Наличие такой модели с общей структурой данных и стандартизированной алгоритмической архитектурой существенно упрощает ее использование в компьютерных системах непрерывного многолетнего расчета. Кроме того, модель, используемая для расчета севооборотов в многолетнем цикле, должна в полной мере поддерживать учет культуры-предшественника во всех значимых аспектах последствия (распад пожнивных остатков, изменение физических и агрохимических свойств почвы, симбиотическая фиксация азота бобовыми растениями и т.д.). Циклический расчет в режиме прогноза на несколько лет вперед предполагает, что в модели должны быть обязательно описаны механизмы «перезимовки», то есть динамика абиотических процессов в экосистеме вне периода активной вегетации растений - промерзание и прогрев почвы, нарастание и стаивание снежного покрова и т.п. Кроме того, модель должна поддерживать не только декларативные (с явным указанием сроков и доз в каждой единице ротации), но и реактивные режимы управления агротехническими мероприятиями (автоматический полив, назначение даты сева



и т.д.), повышая тем самым устойчивость к отсутствию фактической информации об агротехнике. В лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ в течение сорока лет ведутся работы по созданию и усовершенствованию семейства моделей продукционного процесса AGROTOOL [2,3]. Разработанная к настоящему времени версия компьютерной модели третьего уровня продуктивности по классификации де Вита [4] Agrotool v3.5 в полной мере удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям.

Но еще более жесткие требования, нежели к самим моделям, в случае предложенного расширения сферы применения должны быть предъявлены к компьютерным оболочкам или средам их исполнения. Наиболее принципиальное из этих требований связано с обеспечением поливариантного расчета модели, то есть возможности последовательного запуска модели на счет в автоматическом (пакетном) режиме для большого количества альтернативных вариантов с подготовленными заранее наборами входных данных.

### **Система поливариантного анализа динамических моделей агроэкосистемы «APEX».**

Типичный прецедент использования модели в любой системе поддержки решений чаще всего предполагает не единичный, а множественный расчет с разными наборами входных параметров с целью анализа и сравнения получаемых результатов. Необходимость организации и автоматизации такого рода вычислений приводит нас к понятию *многофакторного компьютерного эксперимента*. Нетрудно показать, что его проведение связано с подготовкой огромных массивов информации и выполнением большого числа рутинных операций, что обуславливает актуальность полной или хотя бы частичной автоматизации этой работы. Для этой цели в Агрофизическом НИИ в последние годы создана универсальная (допускающая подключение произвольной внешней модели) оболочка или среда планирования и осуществления поливариантных расчетов динамических моделей агроэкосистемы APEX (Automation of Polyvariant Experiments) [5].

Основными понятиями информационной модели APEX, обеспечивающими функционал запуска подключенной модели в пакетном режиме, являются «Проект», «Сценарий» и «Уровень фактора». Под факторами понимается ограниченное число информационных доменов, на которые можно разбить данные, задействованные в расчете любой динамической модели агроэкосистемы. Таких, predetermined для автоматизируемой предметной области, доменов (факторов) нами выделено шесть. Это «местность», «погода», «сорт/культура», «почва», «начальное состояние» и «технология». Тогда входные данные для каждого единичного варианта расчета модели можно представить в виде кортежа ссылок на конкретные значения (уровни, градации и т.д.) каждого из этих predetermined факторов.

Проект представляет собой описание конкретного эксперимента, который предполагается осуществить. Он состоит из произвольного числа сценариев, каждый из которых отвечает одному из будущих прогонов модели, который, в свою очередь, представляется в виде набора контрольных директив,

определяющих какие варианты факторов (то есть какие почва, культура, погода и т.д.) будут использованы в качестве входных данных для соответствующего варианта расчета.

Таким образом, планирование компьютерного эксперимента в АРЕХ состоит из двух этапов — формирования всех интересующих нас в настоящий момент уровней факторов (каждый из которых, в свою очередь, может иметь сложную структуру, то есть состоять из нескольких взаимосвязанных наборов или таблиц уникальных данных) и объединения их в структуру «проект-сценарии». В системе предусмотрено несколько альтернативных сервисных механизмов получения данных, формирующих «уровень фактора» для их сохранения и последующего использования в проектах – получение их из базы данных нормативной информации или полевого опыта, а также ручной ввод, варьирование ранее введенных опорных значений, генерация синтетических сценариев погоды и т.д. [6]

Процедура формирования схемы компьютерного эксперимента или последовательности прогонов модели в терминах проекта (перечня сценариев) при этом оказывается достаточно простой. Требуемый набор сценариев вычисляется как полное или, в общем случае, неполное декартово произведение всех выбранных для анализа уровней для каждого из факторов.

Проект, созданный как набор сценариев, может быть «просчитан» в любой момент времени. Расчет проекта, то есть непосредственное проведение компьютерного эксперимента, сводится к последовательному запуску соответствующим образом зарегистрированной внешней имитационной модели путем вызова главной функции специального адаптера с набором входных данных, отвечающим текущему сценарию и записи полученных результатов во временное хранилище. После полного расчета проекта весь набор полученных результатов может быть проанализирован с помощью встроенных в систему средств статистической обработки данных (в системе предусмотрены механизмы табличной и графической визуализации, а также специализированные плагины обработки данных для одно-, двух- и многофакторных экспериментов с поддержкой повторностей). Принципы формирования проекта и анализа результатов модельных расчетов в системе АРЕХ демонстрируются на рис. 1.

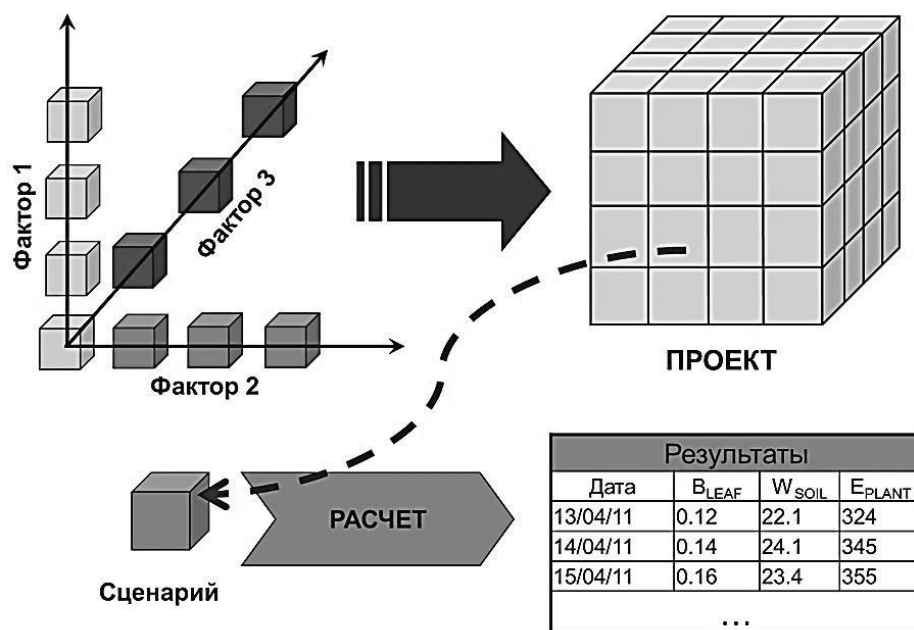


Рис. 1. Принципы планирования и проведения многофакторного компьютерного эксперимента в среде APEX

Созданная оболочка или среда проведения поливариантных расчетов с подключенной к ней моделью продукционного процесса образуют имитационный комплекс APEX-AGROTOOL, который с успехом применяется для решения различных задач теоретической агроэкологии и практического растениеводства. Так, в качестве примера использования этого комплекса в задачах оперативного управления сельскохозяйственными посевами можно привести практику on-line сопровождения полевых опытов на Меньковском филиале Агрофизического НИИ [7]. При этом специальный сервис отвечает за поступление оперативных погодных данных от установленной на поле автоматической метеостанции; источником поливариантности выступает «веер» реализаций погодных условий от момента прогноза до конца вегетационного периода, а статистическая обработка соответствующих результатов моделирования дает возможность осуществлять постоянный, динамически уточняющийся прогноз продуктивности, фенологического развития и других характеристик агроценоза непосредственно в ходе текущего полевого опыта.

Содержательные результаты могут быть также получены при решении с помощью созданного имитационного комплекса задач, относящихся к плановому или проектному уровням принятия решений. Так, исследуя различные параметры обратной связи для системы автоматического полива на представительном наборе фактических реализаций погоды в засушливых условиях Среднего Поволжья (в этом случае варьированию в факторном эксперименте подвергаются целых два фактора – «погода» и «технология»), была определена наиболее эффективная по экономическому критерию стратегия автоматического орошения [8]. А, используя в качестве входных метеоданных набор синтетических сценариев стохастического генератора погоды с параметрами, соответствующими прогнозам изменения климата в будущем, можно ответить на

вопрос о возможном влиянии глобальных климатических изменений на продуктивность и устойчивость локальных агроэкосистем [9]. Но особый интерес и серьезный вызов для разработчиков представляет использование имитационного комплекса в задачах многолетнего анализа и прогноза динамики агроландшафта с учетом плодосмены, то есть в условиях реального или проектируемого хозяйственного севооборота [10].

### **Анализ многолетних севооборотов в рамках имитационного комплекса APEX-AGROTOOL**

Идеальным решением задачи модельного анализа многолетнего цикла севооборота был бы запуск одного экземпляра модели на счет в непрерывном режиме для нескольких десятков последовательных лет с периодической сменой культур (то есть изменением значений для характерного «культуроспецифичного» подмножества вектора параметров  $\mathbf{a}$ ). Однако структура и содержание большинства современных динамических имитационных моделей агроэкосистем не допускают подобного изменения «статичного» вектора параметров в ходе расчета. Существует и ряд других ограничений идеологического и технического характера, делающих подобную модификацию существующих моделей трудноосуществимой. В этих условиях, наиболее адекватным подходом является переложение ответственности за организацию схемы расчета на внешнюю оболочку, то есть на среду запуска модели. Для этого, дополнительно к имеющейся функциональности поливариантного расчета она должна поддерживать следующие требования:

- Возможность планирования неполного факторного эксперимента (в конкретный год на конкретном поле севооборота выращивается только одна конкретная культура из всех входящих в исследуемый севооборот) и исполнение отдельных сценариев в ходе его проведения в строго определенном порядке (в общем случае должна быть жестко специфицирована конкретная последовательно-параллельная схема выполнения)
- Возможность «переноса» результатов из предыдущего варианта расчета как начальных условий в следующий за ним вариант (то есть учет эффекта последствия культуры-предшественника).

В текущей версии среды APEX оба перечисленных требования реализованы с помощью специальных расширений базовой функциональности. Строгая последовательность исполнения сценариев внутри проекта обеспечивается явным указанием отношения порядка как для набора предопределенных факторов, так и для градаций каждого фактора в диалоге формирования проекта. Дополнительно указывается т.н. «разделяющий» фактор, то есть тот фактор, для которого переход к новому значению уровня по мере исполнения проекта открывает новый независимый цикл последовательного расчета севооборота с обязательным «наследованием» данных (рис. 2). В классических схемах многопольного севооборота таким разделяющим фактором обычно выступает сельскохозяйственное поле, то есть «почва».

Для задания правил «наследования» результатов предыдущего варианта расчета в последующем в APEX реализован специальный механизм сопоставления между собой характеристик из информационных доменов «результаты» и «начальные условия». Сведения о введенных правилах преемственности составляют часть спецификации конкретной регистрирующей в среде APEX имитационной модели. Так, например, для «нативной» модели AGROTOOL влияние предыдущего варианта расчета на последующий обеспечивается перенесением сведений о таких характеристиках вектора состояния агроэкосистемы:

- 1) почвенный влагозапас,
- 2) надземные и корневые растительные остатки,
- 3) содержание органического и минерального азота в почве.

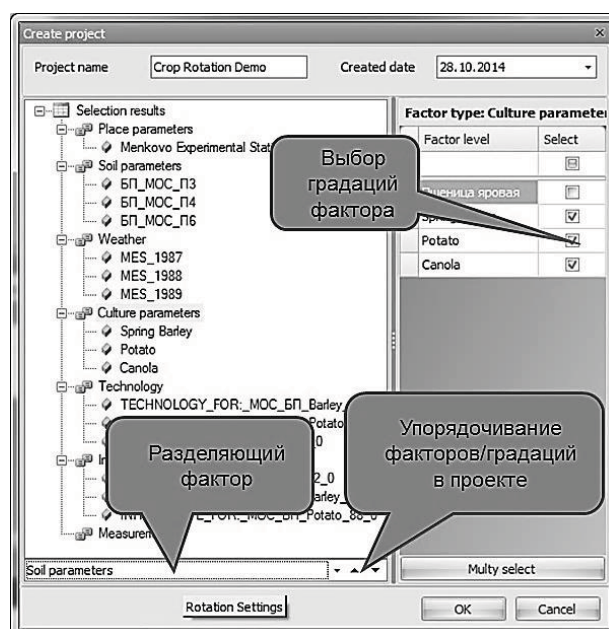


Рис. 2. Интерфейс создания «севооборотного» проекта в APEX

Таким образом, интеграция предметно-ориентированной оболочки исполнения, допускающей семантически-насыщенные процедуры пре- и постпроцессинга (то есть подготовки исходных данных и анализа результатов) и универсальной модели продукционного процесса приводит к получению специфического компьютерного инструмента исследования динамики агроэкологических систем в многолетнем цикле хозяйственного севооборота.

### Результаты

Наиболее наглядно разница между простыми и «севооборотными» расчетами по модели может быть продемонстрирована с помощью специального компьютерного эксперимента, который мы по аналогии с известным голливудским блокбастером назвали «год сурка». Суть этого чисто виртуального, то есть принципиально не воспроизводимого в реальности, эксперимента заключается в том, что одна и та же культура в одних и тех же условиях

(местность, поле, технология) выращивается несколько лет подряд, причем погодные условия с абсолютной точностью повторяются от года к году. Ясно, что в случае обычного использования модели мы будем получать для всех лет (вариантов) расчета один и тот же результат - динамика продукционного процесса будет воспроизводиться без каких-либо изменений. Напротив, для последовательных расчетов в севообороте только результаты для первого года расчета полностью совпадут с опорными (так как для него будут заданы исходные начальные условия), а для всех последующих лет проявится эффект влияния предшествующих сезонов, и динамика продукционного процесса будет уникальной. В частности, в рамках подобного эксперимента можно проследить тенденции истощения или воспроизводства плодородия почв, что обычно является предметом изучения специализированных моделей с большим временным шагом и интервалом действия. Полученные результаты расчета подобного вырожденного монокультурного севооборота в режиме «года сурка» для яровой пшеницы и почвенно-климатических условий Меньковского филиала АФИ приведены на графиках рисунка 3.

В качестве опорных вариантов выбирались две фактических реализации погодных условий в сезонах 2012 и 2013 годов; при этом исследовались две стратегии выращивания – традиционная (уборка с сельскохозяйственного поля как зерна, так и соломы, то есть безвозвратное выведение надземной биомассы из биологического цикла) и «зеленая» (вся биомасса, в том числе и зерно, после достижения спелости оставалась на поле и запахивались в качестве сидерального удобрения на будущий сезон вегетации). Можно сказать, что в последнем случае в определенном смысле эмулировался жизненный цикл естественных луговых фитоценозов. Заметим, что в среде APX все перечисленные вариации исследовались в рамках единственного проекта. Анализ полученных результатов по многолетней динамике продуктивности культуры и истощению плодородия почвы подтверждает ожидаемый вывод о предпочтительности щадящих агротехнологий. Более того, на соответствующих графиках легко выделить период вызванной неточностью задания начальных условий т.н. «раскурутки» модели (spin up), то есть переходного этапа к устоявшемуся, примерно воспроизводимому год от года режиму функционирования агрофитоценоза (steady state).

В качестве примера, имеющего чуть большее отношение к реальности, приведем выборочные результаты, полученные нами в ходе участия в продолжающемся проекте Европейского Сообщества «Crop growth and soil processes modeling - the use of multi-model ensemble for crop rotations under recent and future climatic conditions». Суть проекта заключается в исследовании с помощью моделей продукционного процесса возможного влияния глобальных климатических изменений на продуктивность и стабильность агроэкосистем, а также в поиске и анализе способов смягчения этих негативных последствий. При этом в качестве инструмента исследования выбирается не одна конкретная модель, а используется модная современная методология ансамблевых расчетов,

когда выводы и заключения основываются на комплексировании результатов прогонов разных моделей на одних и тех же входных данных [11]. Принципиальным отличием упомянутого проекта от многочисленных аналогов выступает тот факт, что соответствующие ансамблевые расчеты выполняются в разрезе выбранных схем севооборота, а модификация традиционных практик смены культур выступает основным исследуемым механизмом смягчения возможных последствий изменения климата на сельское хозяйство Западной Европы [12].

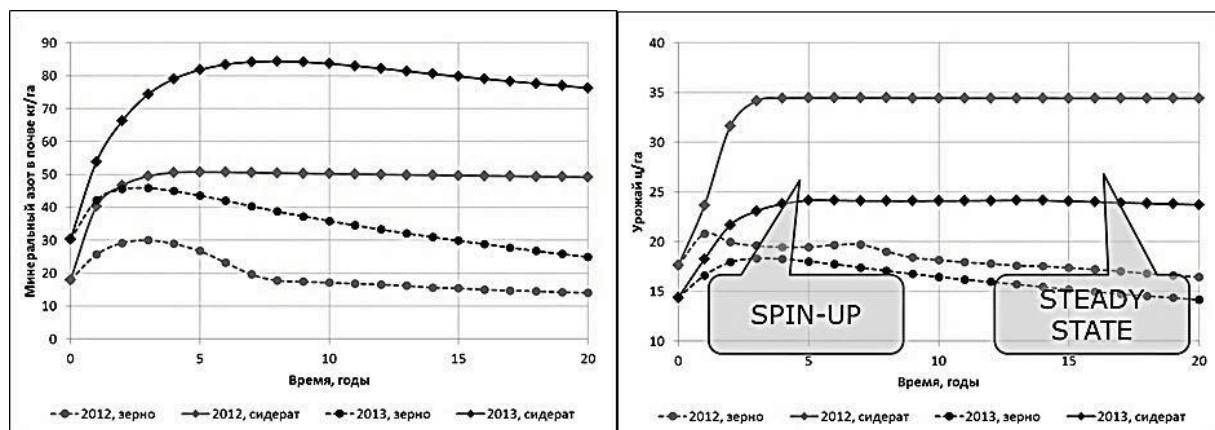


Рис. 3. Динамика минерального азота и урожайности для модельных расчетов в режиме «года сурка».

Чешскими координаторами проекта предложено нескольким рабочим группам участников, представляющих ведущие европейские центры математического моделирования в растениеводстве, осуществить компьютерный эксперимент по анализу двух альтернативных схем севооборота в многолетнем разрезе – с 1961 по 2080 год (погодные реализации будущего климата получены из прогнозных расчетов по модели глобальной циркуляции CGMR RCP8.5). Обе схемы характеризуются циклом повторности, равным 5 годам, а также одной и той же последовательностью чередования основных культур: озимая пшеница - яровой ячмень – кукуруза на силос – озимая пшеница – озимый рапс. Первая (традиционная) схема севооборота предполагает использование только минеральных удобрений и полное удаление надземных растительных остатков в момент уборки урожая. Альтернативная, (щадящая или перспективная) система землепользования характеризуется той же последовательностью основных культур, но дополнительно в цикл вводится промежуточная (межпосевная) сидеральная культура, заполняющая сезонные зимние промежутки перед посевом яровых. Кроме этого, изменяется технология уборки, так, что большая часть соломы, остающаяся после уборки злаков, остается на поле в виде сидерального удобрения. И наконец, помимо базового азотного минерального удобрения, в щадящем севообороте после основных культур (за исключением озимого рапса) вносится дополнительно 40 тонн на гектар органического удобрения в форме навоза (рис. 4).

В настоящее время работы по проекту находятся в самом разгаре, однако российской группой в качестве встречной инициативы были произведены предварительные расчеты в имитационном комплексе APEX-AGROTOOL для ряда тестовых вариантов с целью изучения вопроса о сравнительной эффективности трех предложенных способов смягчения негативных экологических последствий традиционных практик хозяйствования в условиях изменяющегося климата (межпосевная культура, органическое удобрение, изменение технологии уборки).

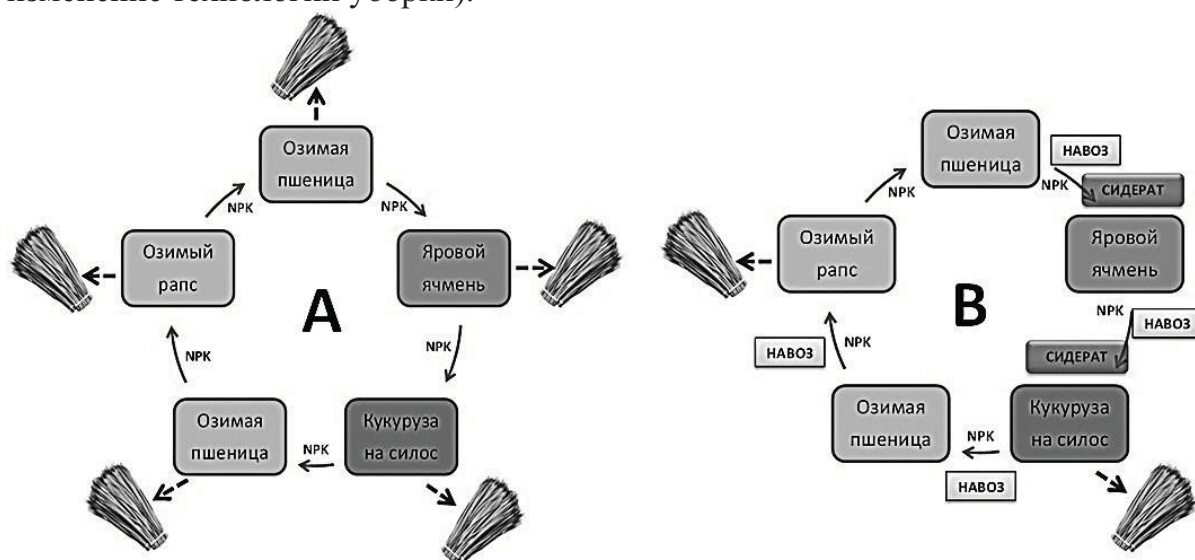


Рис. 4. Традиционная (А) и щадящая (В) схемы севооборота

В среде APEX были сформированы проекты и проведены компьютерные эксперименты по исследованию следующих вариантов расчета:

- базовый (Bas) - опорный севооборот без навоза и промежуточной культуры, с традиционным способом уборки урожая, когда растительные остатки полностью удаляются с поля;
- полный (CC+Fec+Res) – с озимой промежуточной культурой (CC), навозом в качестве удобрения (Fec), а также применением почвозащитной техники уборки урожая (Res), когда все непищевые надземные растительные остатки остаются на поле (щадящая система);
- промежуточные варианты (CC, CC+Fec, CC+Res).

Ряд полученных результатов приведен на рис. 5. Из графиков видно, что насыщение севооборота межпосевной культурой в совокупности с использованием навоза пожнивных остатков действительно дает наиболее благоприятную картину динамики содержания гумуса в почве. Это объясняется тем, что наличие вышеперечисленных факторов способствует активизации микрофлоры почвы, в результате чего органические остатки быстрее разлагаются на легкодоступные питательные вещества, улучшаются агрофизические свойства почвы в севообороте и, как следствие, меньше угнетается плодородие. Таким образом, увеличивая количество растительных остатков и улучшая качество их «переработки» путем внесения навоза, мы можем способствовать сохранению



органического вещества почвы, более полному восстановлению плодородия почвы и существенному увеличению выхода продукции в севообороте. При этом согласно модельным расчетам, для воспроизводства гумуса примерно одинаково существенными факторами оказываются дополнительное внесение органического удобрения и переход к экономным технологиям уборки, а увеличение хозяйственной продуктивности практически полностью обуславливается только первым из них. В то же самое время, ввод в севооборот дополнительной межпосевной культуры оказывает слабое и неоднозначное влияние на отслеживаемые показатели, что ставит под вопрос целесообразность использования этого приема для достижения заявленных целей.

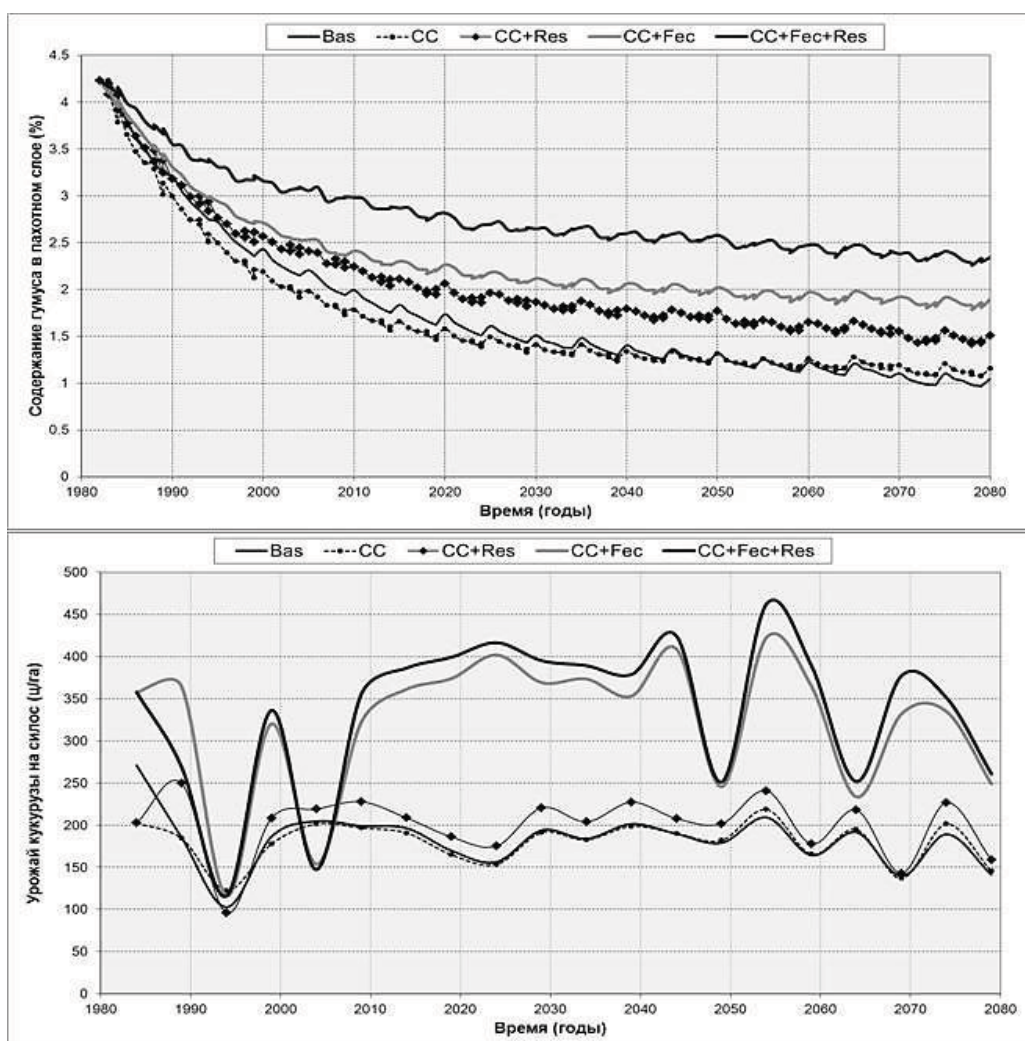


Рис. 5. Динамика содержания гумуса в почве и урожаев кукурузы на силос в многолетнем цикле исследованных систем севооборота (фактические и прогнозные почвенно-климатические условия опытного хозяйства Верованы, Чехия)

### Заключение

Идея расширения традиционной сферы применения динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур в последнее время приобретает все большую притягательность. Это расширение рассматривается в двух аспектах. С одной стороны увеличивается перечень культур, допускающих модельное исследование в рамках семейств универсальных моделей экофизиологической направленности. Подобное функциональное расширение сферы применения моделей достигается путем универсализации их структуры и последующей параметрической идентификации. С другой стороны, магистральной тенденцией становится расширение временного горизонта модельных прогнозов – переход от расчетов единичных изолированных сезонов вегетации к многолетним непрерывным расчетам севооборотов с учетом смены культур в многолетнем цикле сельскохозяйственного землепользования. Созданный в лаборатории математического моделирования агроэкосистем АФИ имитационный комплекс АРЕХ-AGROTOOL объединяет в себе два обозначенных направления развития и может служить эффективным инструментом поддержки решений в задачах среднесрочного планирования и анализа альтернативных стратегий землепользования с учетом требований их экологичности, устойчивости и ресурсосбережения.

### Список литературы:

1. Нерпин С.В., Жуковский Е.Е. О классификации уровней принятия решения решений в растениеводстве и земледелии // Доклады ВАСХНИЛ, 1975, №2, С. 3-5.
2. Poluektov R.A., Fintushal S.M., Oparina I.V., Shatskikh D.V., Terleev V.V. and Zakharova E.T. AGROTOOL – a system for crop simulation // Archives of Agronomy and Soil Science, 1476-3567, Vol. 48, Issue 6, 2002, P. 609-635.
3. Badenko V., Terleev V., Topaj A. AGROTOOL software as an intellectual core of decision support systems in computer aided agriculture // Applied Mechanics and Materials. 2014. v. 635-637. P. 1688-1691.
4. De Wit, C.T. Coordination of models. In: Penning De Vries, F.W.T.; Van Laar, H.H. (Ed.) Simulation of plant growth and crop production. - Wageningen: PUDOC, 1982.
5. Medvedev S., Topaj A. Crop simulation model registrator and polyvariant analysis. IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2011. V. 359, P. 295-301.
6. 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. IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2015. V. 448, P. 252-261.
7. Медведев С.А., Топаж А.Г., Белов А.В., Глядченкова Н.А., Лекомцев П.В. Распределенный измерительно-моделирующий комплекс для оперативного сопровождения полевого опыта // «АгроЭкоИнфо», 2015, №2, [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/2/st\\_08.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/2/st_08.doc)

8. 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.
9. Полуэктов Р.А., Топаж А.Г., Якушев В.П., Медведев С.А. Использование динамической модели агроэкосистемы для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов (теория и реализация) // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. №2. С. 7-12.
10. 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.
11. Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J.E., Patil, R.H. Ruget, F., Rumbaur, C., Takáč, J., Trnka, M., Bindi, M., Caldag, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel, W., Saylan, L., Šiška, B., Rötter, R., 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy* (35): P. 103-114.
12. Hlavinka, P., Kersebaum, K.Ch., Dubrovský, M., Fischer, M., Pohanková, E., Balek, J., Žalud, Z., Trnka, M., 2015. Water balance and drought stress for field crop rotations in present and future conditions. *Climate Research*, (under revisions).

## МИНИМАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ УБЕГАНИЯ-ПРЕСЛЕДОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ХИЩНИК-ЖЕРТВА

Тютюнов<sup>1,2</sup> Ю.В., Титова<sup>2</sup> Л.И.

<sup>1</sup>Институт аридных зон Южного научного центра РАН, г. Ростов-на-Дону

<sup>2</sup>Институт математики, механики и компьютерных наук им.И.И. Воровича

Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону

tyutyunov@sfedu.ru; ltitova@sfedu.ru

Модели пространственно-временной динамики трофических сообществ являются эффективным инструментом, позволяющим анализировать многообразие процессов, определяющих сложную динамику как водных, так и наземных экосистем при решении прикладных задач управления биоценозами (например, [1, 2]). К таким задачам относятся проблемы эксплуатации возобновляемых промысловых ресурсов, охраны и поддержания популяций редких животных, биологического контроля численности вредных видов флоры и фауны, прогнозирования последствий натурализации инвадеров, восстановления нарушенных биогеоценозов. Важным элементом моделей пространственно-распределённых экосистем является описание