



Топаж Александр Григорьевич. 23.01.1969. Окончил физико-механический факультет ЛПИ. С 1989 года работает в лаборатории математического моделирования агроэкосистем АФИ. С 2012 года - заведующий лабораторией. Доктор технических наук.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОДУКТИВНОСТИ: ТУПИК ИЛИ РАСПУТЬЕ?

А.Г. Топаж

Агрофизический НИИ, Санкт-Петербург

Введение

В июне 2012 года мы вместе с О.Д. Сиротенко отправились в Барнаул на организованный Любовью Хворовой семинар «Фундаментальные и прикладные исследования в математической экологии и агроэкологии». Эта встреча была задумана еще при жизни Ратмира Александровича, получила его полное одобрение, он принимал непосредственное участие в ее подготовке и, несмотря на уже, прямо скажем, не самое крепкое здоровье, довольно долго всерьез рассматривал возможность участия в ней. Хотя об этом нигде не говорилось прямо, но и он, и мы, его ученики, втайне лелеяли надежду, что эта встреча сможет возродить традицию ПУМ-ов – тех конференций «модельеров» семидесятых-восемидесятых годов прошлого века, из которых, в общем-то, и выросла вся советская школа математического моделирования в агроэкологии. Однако получилось так, что фактически этот семинар оказался посвященным его памяти...

Мы встретились с Олегом Дмитриевичем в аэропорту Шереметьево и летели вместе рейсом «Москва-Барнаул». Пятичасовой перелет дает исключительную возможность поговорить в спокойной обстановке о самых разных вещах, для обсуждения которых в конференционной, рабочей и даже банкетной суеде обычно не находится времени. Кроме того, давно замечено, что длительная совместная поездка почему-то располагает к задушевному и искреннему разговору. Олег Дмитриевич тоже возлагал большие надежды на предстоящую встречу в плане возрождения ПУМов, хотя и сознавал, насколько сузился круг людей, занимавшихся когда-то этой проблемой, и насколько незначительным оказалось его пополнение учеными нового поколения. Меня же очень занимал один конкретный вопрос. В свое время выделились два одинаково мощных направления - ленинградская и подмосковная школы математического моделирования продукционного процесса растений. Практически все исследователи, занимавшиеся вопросами прогноза продуктивности, использовали или «модель Полуэктова», или «модель Сиротенко». Действительно, хотя и в Эстонии, и на юге России (в Ростове)

существовали мощные коллективы исследователей, до реально работающего состояния были доведены, пожалуй, только базовые модели Агрофизического НИИ и Обнинского ВНИИСХМ. Сотрудничество и, что уж теперь скрывать, определенная конкуренция этих двух направлений формировали своеобразный «рынок» моделей в плановой экономике исследований по созданию «электронного агронома».

Мне, конечно, было прекрасно известно современное состояние дел с «Полужетковской» моделью AGROTOOL – она, несмотря на все пертурбации и трансформации, дожила до настоящего времени, существует в виде нескольких законченных версий, может быть свободно скачана с открытого Интернет-ресурса и используется по назначению немногочисленными энтузиастами в России и республиках бывшего СССР. В то же время судьба базовой динамической модели, созданной в Обнинске, оставалась довольно туманной – судя по публикациям, можно было заключить, что актуальные работы лаборатории математического моделирования ВНИИСХМ, связанные с исследованием влияния изменений климата на сельское хозяйство, выполняются по упрощенным регрессионным методикам без привлечения «наукоемкой» динамической модели.

Олег Дмитриевич подтвердил мои предположения. Более того, он высказал мнение, что время показало ограниченность и, в определенной мере, тупиковость подхода, связанного с разработкой подобных моделей сложной структуры и мощного алгоритмического наполнения. По его словам, стоящие перед агрометеорологией реальные практические задачи (районирование культур, оценка агроклиматических потенциалов для современного и будущего климата, оценочные оперативные прогнозы продуктивности в региональном масштабе и т.д.) прекрасно решаются с привлечением простых, надежных и устойчивых методик – агрометеорологических прогнозов регрессионного характера. Использование же для решения этих задач динамических «экофизиологических» моделей приводит лишь к неоправданным затратам времени на проведение расчетов и к повышению вероятности получения необъяснимых результатов, вызванных, на самом деле, внутренними ошибками моделей. При этом гипотетическое повышение точности расчетов оказывается совершенно незначительным, и, главное, совершенно излишним для рассматриваемых проблем. Иными словами, овчинка оказалась совершенно не стоящей выделки, и работы по развитию базовой динамической модели в его лаборатории оказались практически свернуты вот уже несколько лет назад.

Отмечу еще раз, что это жесткое мнение было высказано в частной беседе: насколько мне известно, в открытой печати Олег Дмитриевич дискуссии о современной роли моделей не поднимал. Тем не менее, сказанное им произвело на меня очень сильное впечатление. Безусловно, схожие скептические соображения я слышал не раз от многих специалистов, занимающихся исследованиями практической направленности. Нет недостатка в критических публикациях подобного рода и в англоязычной научной литературе. Даже сам используемый термин «simulation» (в отличие от нейтрального русского перевода «моделирование») содержит в оригинале определенную негативную

окраску, что провоцирует авторов статей соответствующе оценивать деятельность теоретиков-модельеров. Более того, иногда в полемическом задоре даже авторы серьезных научных публикаций позволяют себе такие хлесткие определения, как «snake oil», то есть «шарлатанство». Часто это можно списать на недостаточное понимание оппонентом сути вопроса и на то, что «время моделей еще не пришло» и т.д.

Однако в данном случае такие соображения не проходят – сомнения в полезности динамического имитационного моделирования были высказаны одним из основателей этого направления, человеком, чья книга «Моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем» [1] наряду с монографиями Р.А. Полуэктова и Х.Г. Тооминга [2, 3] служила учебником для всех русскоязычных специалистов. Более того, характерной чертой «школы Сиротенко», по сравнению с «Полуэктовской школой», как раз являлось стремление «дойти до самой сути», рассмотреть все процессы с большим уровнем детальности. Например, описать рост и развитие растений не на уровне органов, а на уровне отдельных фитомеров [4], на что мы в модели AGROTOOL даже не рассчитывали. И после этого полета мысли возвращение к «примитивным» статистическим регрессионным моделям?!

Остается только сожалеть, что наша дискуссия осталась, как обычно, незаконченной. Осенью того же года Олега Дмитриевича не стало. Юхан Карлович Росс, Хейно Густавович Тооминг, Ратмир Александрович Полуэктов, Олег Дмитриевич Сиротенко... Из «отцов-основателей» этого направления не осталось уже никого. Нам, второму поколению модельеров, их преемникам, предстоит разобраться с теми принципиальными вопросами о роли и месте моделей в агроэкологии, которые снова встали со всей остротой в последнее время. Действительно, Олег Дмитриевич в нашей беседе просто озвучил ту общую тенденцию разочарования или, точнее, несоответствия полученных результатов завышенным ожиданиям, которая проявляется сейчас не только по отношению к моделированию в сельском хозяйстве, но и к имитационному моделированию вообще. Данная статья не претендует на то, чтобы полностью разрешить эти противоречия, скорее она направлена на то, чтобы честно обозначить проблемные точки и инициировать серьезное обсуждение путей преодоления реально существующего кризиса и дальнейшего развития нашей науки. В конце концов, не замалчивать трудности, а признавать и преодолевать их – это один из тех принципов, которому мы должны следовать согласно заветам наших учителей.

История вопроса

В четвертом и пятом номерах журнала «Новый мир» за 1987 год был опубликован роман известного советского писателя Владимира Тендрякова «Покушение на миражи». В отличие от других появившихся из запасников произведений, впервые увидевших свет в начальные перестроечные годы, этой книге сравнительно повезло. Хотя умерший за три года до этого автор так и не увидел своего творения в печатном виде, книга пролежала в редакторском столе всего пять лет. По воспоминаниям людей, близко знавших писателя, он

считал этот роман главной книгой своей жизни, своим философским завещанием.

Главный герой «Миражей» - профессиональный физик, решивший «поверить алгеброй гармонию» на современных ЭВМ. А именно, смоделировать на компьютере весь ход человеческой истории, в частности – «проиграть» варианты развития нашей цивилизации, «изымая» из них ключевую фигуру Иисуса Христа. Конечно, описанная фабула нужна автору, в основном, для серьезных философских рассуждений о ценности идеи гуманизма. Но в контексте данной статьи интересен другой, гораздо менее значимый вопрос.

Сейчас невозможно без улыбки читать страницы, на которых ученые суетливо готовят перфокарты с данными о возникновении христианства для только что построенного компьютера. Но вот что интересно. То, что сейчас однозначно интерпретируется как научная фантастика, тогда воспринималось как безусловная реальность не то что завтрашнего, а уже сегодняшнего дня. Люди, имевшие тогда хотя бы отдаленное отношение к вычислительной технике, читая роман Тендрякова, ни минуты не сомневались, что модель человеческой истории построить и просчитать на компьютере, конечно же, можно. Да, наверное, мощностей имеющейся у нас машины СМ для этого не хватит, но вот если получить выход на ЕС!.. В художественном произведении писателем на очень ярком примере были продемонстрированы те радужные перспективы и ожидания, которые именно в это время связывались у ученых самых разных областей – как естественников, так и гуманитариев - с появлением абсолютно новых возможностей исследования, предоставляемых бурным развитием вычислительной техники. Казалось, рушится последний барьер на пути познания – любую, сколь угодно сложную формулу или совокупность сложных формул (то есть модель!) можно просчитать, проинтегрировать, проанализировать за вполне реальное, конечное время. А это значит, что никаких принципиальных технических ограничений для исследования систем неограниченно сложной структуры более не существует.

Неизвестно, предпринимались ли тогда на самом деле где-то в специализированных институтах попытки построить имитационную модель (так это сейчас называется) истории человечества. Но детальные модели эволюции органической жизни на Земле с попыткой воспроизведения динамики появления и исчезновения видов, с выходом на современную картину биоразнообразия и экстрополяцию в будущее строились в то время на полном серьезе. Где сейчас эти модели? Известно, что первым рабочим названием романа Тендрякова было «Евангелие от компьютера», что отвечало технократической посылке главного героя восстановить «связь времен» с помощью ультрасовременных вычислительных инструментов. В окончательной же редакции осталось «Покушение на миражи». Похоже, что «инженер человеческих душ» смотрел в будущее несколько более трезво, чем большинство его современников – «настоящих» инженеров.

С тех пор прошло почти тридцать лет – огромный отрезок времени по шкале технического прогресса. Сравнить по возможностям и

производительности сегодняшние компьютеры (уже даже не компьютеры, а вычислительные сети планетарного масштаба) с «убогими шкафами» конца восьмидесятых даже как-то неловко. Имитационное моделирование сложных систем как отдельная, особая отрасль науки тоже никуда не делась и, более того, вполне успешно развивается. Нельзя также сказать, что в этой области отсутствуют прорывные результаты: в конце концов, все выдающиеся современные успехи молекулярной генетики (расшифровка генома и др.) непосредственным образом связаны с использованием компьютерных моделей и программ анализа. Но ни модели истории цивилизации, ни модели биологической эволюции, ни комплексной модели онтогенеза так и не появилось. Возвращаясь опять к исходной предметной области, нельзя не отметить удивительный факт. Когда-то базовая модель агроэкосистемы представляла собой несколько толстенных кип перфокарт. Внесение даже небольшого изменения требовало от исследователя огромного количества аккуратно выполняемых операций - переписывания текста, печатания новых карт на перфораторе, сверки и исправления механических ошибок (прорезания бритвой непробившихся или заклеивания пробившихся на неправильном месте «окошек»), передачи получившейся стопки оператору ЭВМ как единственному жрецу, допускаемому в капище неведомого божества, и смиренного ожидания распечатки с результатом. Сейчас исправление, перекомпиляция и запуск на счет новой версии модели на персональном компьютере занимает несколько секунд. Но вот парадокс. Ни по степени сложности, ни по устойчивости функционирования принципиальных различий между старыми и современными моделями нет.

Вообще, если говорить о моделях в экологии, то именно середина 80-х гг. является рубежом между двумя принципиальными подходами к моделированию. Начиная с момента становления математической экологии как науки, то есть с появления классических трудов Фибоначчи, Мальтуса, Вольтерра, исследователи оперировали так называемыми качественными моделями. Единственными подручными средствами были лист бумаги и перо. Бедность инструментария определяла верхний предел сложности изучаемых математических формализаций. Как правило, качественные модели представляли собой систему нескольких достаточно простых по форме дифференциальных или разностных уравнений, допускающих если не нахождение точного аналитического решения, то, по крайней мере, детальное аналитическое исследование – нахождение особых и стационарных точек, определение их характера, выделение областей устойчивости различных ветвей решений, анализ устойчивости по Ляпунову, построение траекторий динамики фазовых переменных для линеаризованных аналогов и т.п. Здесь нельзя не отметить заслуженный авторитет, которым пользовалась в мире советская школа исследования качественных моделей в экологии, связанная с именами И.А. Полетаева, А.М. Молчанова, А.Д. Базыкина и других замечательных ученых [5].

Однако очевидно, что даже для исследователя высочайшей квалификации подобный въедливый и кропотливый анализ в принципе был возможен лишь

для очень простых систем. Иными словами, качественной моделью можно описать только основные эффекты и факторы, оказывающие влияние на изучаемый процесс, но никак не все множество разнородных причин и взаимодействий, составляющих сущность любого явления биологической природы. Размерность и нелинейность обуславливали ограниченность качественных моделей и почти полную невозможность интерпретации их результатов в применении к реальным объектам живой природы. Появление компьютеров изменило ситуацию в корне. На смену простым качественным пришли многомерные имитационные модели с неограниченно большим количеством фазовых переменных состояния, а всестороннее аналитическое исследование характера всех возможных решений заменилось прямым численным интегрированием с получением конкретной траектории поведения системы в явном виде. Можно сказать, что теоретический, традиционно «университетский» подход к исследованию проблемы уступил место утилитарному «политехническому» методу.

Бум имитационного моделирования не спал до настоящего момента, и более того, в него продолжают вовлекаться все новые области не только науки, но и практической жизни. Оказалось, например, что для полноценной игры в гольф совершенно необязательно отводить огромные пространства и много лет ухаживать за специально спроектированным ландшафтом. Достаточно иметь современный большой и прочный сенсорный экран, с помощью которого визуализируется текущий вид виртуального игрового поля и модель, в которой обрабатывается направление и скорость полета мяча (мяч, клюшка и игрок пока остаются реальными, но, видимо, недалек тот день, когда и они без потери остроты восприятия смогут быть заменены компьютерными аналогами). Но при этом трудно избавиться от ощущения, что как раз в нашей отрасли – в динамическом моделировании продукционного процесса сельскохозяйственных растений – пик интереса и энтузиазма уже пройден. Действительно, идея о том, что в модель можно «насыпать» столько, сколько захочешь, формул и алгоритмов, отразив при этом в ней все аспекты поведения моделируемого объекта – агроэкосистемы – оказалась не столь тривиальной и очевидной. Выяснилось, что подобный «экстенсивный» путь развития модели сопряжен с большим количеством сопутствующих негативных моментов. Пожалуй, основной из них – утрата прозрачности и интерпретируемости результатов модельных расчетов. Действительно, получив некий неожиданный результат, например резкое падение урожая при определенном сочетании внешних факторов, автор модели, как правило, не в состоянии сразу четко ответить, какой из многочисленных заложенных в алгоритм механизмов привел к подобной картине. Более того, при детальном и весьма непростом анализе может выясниться, что сработал не один конкретный механизм, а совокупное действие нескольких из них породило эмерджентный эффект. Если этот феномен отражает реальность, значит модель блестяще исполнила свою роль, послужила источником нового знания. К сожалению, гораздо чаще приходится констатировать, что мы имеем дело с артефактом моделирования, вызванным внутренними ошибками либо в логике, либо в технической реализации модели.

Наверное, утрата контроля и прослеживаемости причинно-следственных связей – это основная причина того, что процесс создания новых и развития существующих компьютерных моделей продуктивности достиг точки насыщения, или, говоря псевдонаучным языком, «вышел на плато». В качестве доказательства этого не слишком оптимистического утверждения в следующем разделе статьи делается попытка осмыслить сегодняшнее состояние дел, то есть дать субъективную оценку текущей ситуации в соответствующем научном направлении.

Симптомы

Если изучить подборки статей, имеющих отношение к моделям продукционного процесса, в ведущих периодических научных изданиях по направлению («Ecological Modeling», «Computers and Electronics in Agriculture», «Environmental Modeling and Software», «Agronomy Journal», «European Journal of Agronomy» и др.), можно отметить интересный факт. Непосредственно моделированию, то есть математическому описанию тех или иных процессов в системе «почва-растение-атмосфера», или алгоритмам, реализующим это описание, посвящена очень небольшая часть публикаций. Львиная же доля статей посвящена вопросам обслуживания, информационного обеспечения, сравнения или использования уже существующих моделей. Создается впечатление некой аберрации взгляда или изменения точки интереса – основным предметом изучения становится не само исходное природное явление, а его математическая модель. Здесь можно провести прямую аналогию с постмодернизмом – культурным направлением, в котором предметом произведения искусства выступает не реальная жизнь, а культурная среда, то есть отражение реальной жизни в других, созданных ранее произведениях искусства. Согласно звонкому определению классика российского постмодернизма Виктора Пелевина, «постмодернизм – это коровье бешенство культуры, вынужденной питаться порошком из собственных костей» [6]. И подобно тому, как многие художественные критики (в частности, все адепты реализма) считают засилье постмодернизма однозначным свидетельством наступления кризиса традиционной европейской культуры, уход в исследование свойств уже имеющихся моделей вместо разработки и развития новых может служить признаком определенного застоя в области математического моделирования агроэкосистем.

Более того, «постмодернизм» в области моделирования имеет ряд особенностей, отличающих его в худшую сторону от своего культурного аналога. Действительно, художественный постмодернизм стоит на фундаменте многовековой культурной традиции, и во многом метания современных авторов подкрепляются аргументами о том, что «все уже написано». Иными словами, классической культурой уже разработаны все основные сюжеты и исследованы все принципиальные перипетии человеческой жизни. Можно спорить о том, насколько это утверждение соответствует истине, но, во всяком случае, эти соображения совершенно не применимы к нашей научной области. И если появление «второй производной» в культурном пространстве

объясняется пресыщенностью, то современная «суэта вокруг моделей» проистекает, наоборот, от бедности, то есть из-за отсутствия некой универсальной, пригодной на все случаи модели и попыток приспособить для решения тех или иных конкретных задач «то, что есть в наличии». Для доказательства этого утверждения достаточно просто перечислить основные проявления современного модельного «постмодернизма», который так и хочется назвать «постмоделизмом».

- *Абстрагирование.* Под этим обобщенным термином в западной литературе понимается комплекс мер по последовательной модификации сложной комплексной модели в сторону упрощения с целью максимально приспособить ее для решения конкретной поставленной задачи. В статье Я.А. Пачепского из настоящего сборника [7] дан исчерпывающий анализ методов и подходов абстрагирования в приложении к моделям почвенной гидрофизики. В частности, одним из наиболее «модных» методов абстрагирования является метамоделирование.
- *Метамоделирование,* то есть, интерпретируя дословно, построение моделей моделей – вот уж постмодернизм в чистом виде! Сущность подхода заключается в следующем. Берется исходная сложная модель и используется как некий «черный ящик» с единственной целью - получить набор результатов (откликов) в терминах интересующих нас показателей для заранее выбранного представительного набора входных условий. После чего на полученном пространстве пар результатов «вход-выход» строится наилучшим образом описывающая эти соотношения формальная упрощенная модель в выбранном классе зависимостей. В обзорной работе [8] подробно рассмотрены основные стадии и принципы метамоделирования. В частности, там представлен перечень и проведено сравнение нескольких принципиальных алгоритмических подходов к построению редуцированных статических аналогов сложных моделей – параметризация поверхности отклика, нейронные сети, индуктивное обучение, кригинг и пр. Теоретические вопросы построения упрощенных моделей с сохранением динамического характера прототипа рассмотрены в работах Эберляйна [9]. Там предложена формальная теория редукции исходно сложных моделей системной динамики путем аппроксимации их наблюдаемого поведения линеаризованными соотношениями в форме систем обыкновенных дифференциальных уравнений. К сожалению, требование линейности аппроксимаций, выступающее необходимым условием применимости метода, зачастую оказывается слишком сильным для множества исходных моделей реальных систем. Возможно более перспективным подходом здесь окажется поиск упрощенных динамических аналогов в классе систем обыкновенных дифференциальных нелинейных уравнений, допускающих физическую интерпретацию [10]. Заметим, что одной из важных целей метамоделирования является получение формализаций, допускающих аналитическое исследование (структурную адаптацию операторными дополнениями, поиск оптимального управления и т.п.). Иными словами, происходит возврат от громоздких имитационных к

прозрачным качественным моделям! Базовая динамическая модель при этом низводится к роли поставщика наборов данных «вход-выход», а единственной причиной использовать ее для этой цели вместо реального объекта выступает простота и скорость осуществления модельного расчета по сравнению с постановкой и проведением натурального эксперимента.

- *Комплексование или ансамблевые расчеты.* Крайне популярным в настоящее время является проведение так называемых ансамблевых расчетов, то есть вычисление интересующей исследователя характеристики с использованием не одной, а целого набора альтернативных моделей и получение искомой оценки путем той или иной статистической обработки выборки полученных результатов. Апологией метода комплексования выступает соображение о том, что при отсутствии однозначно лучшей модели есть смысл полагаться на коллективный разум. Кроме того, закон больших чисел из математической статистики никто не отменял, а, следовательно, существует весьма высокая вероятность того, что в ходе тем или иным способом проводимого усреднения ошибки отдельных моделей взаимно нивелируются и «истинный», то есть адекватный реальности, результат выплывет из «шлака» частных ошибочных оценок естественным образом. В последнее время активно разрабатывается специальная методология и даже отдельный математический аппарат процедуры планирования и осуществления ансамблевых расчетов и комплексования результатов. Наибольшее распространение метод расчета по ансамблю моделей приобрел в климатологии, в частности – в построении сценариев будущих климатических изменений [11]. И действительно, число известных в мире альтернативных моделей глобальной циркуляции, на основании которых делаются климатические прогнозы, приближается уже к трем десяткам. При этом даже приблизительного согласия в оценках масштабности грядущего глобального потепления (да и потепления ли?..) научное сообщество так и не выработало. В этих условиях ансамблевые расчеты, помимо прочего, выступают удобным механизмом размытия ответственности за публикуемые предсказания. Близко к комплексованию примыкают также многочисленные «соревновательные» проекты сравнительной оценки, в ходе которых несколько конкурирующих моделей рассчитываются на одном наборе входных данных и определяется «чемпион», то есть та из них, которая дает наиболее схожий с реальностью результат [12]. Нельзя не признать, что комплексование и сравнение моделей представляют собой занятные математические и методологические упражнения, имеющие, тем не менее, весьма опосредованное отношение к моделированию как таковому.
- *Искусственное расширение сферы применимости.* Высшим пилотажем в работе с компьютерными имитационными моделями собственного или чужого авторства является их использование в тех сферах и приложениях, для которых они никоим образом не предназначались ни по своей задумке, ни по конечной реализованной функциональности. Приведем только два примера подобной изысканной эквилибристики. Во-первых, существует

«сумасшедшая» идея использовать типичную одномерную, то есть точечную, модель для эмуляции пространственно неоднородного агроландшафта [13]. Для этого предлагается в рамках разработанной компьютерной системы поливариантного анализа реализовать функционал параллельных синхронизированных вычислений нескольких независимых экземпляров используемой модели, отвечающих различным узлам пространственной сетки на имитируемом сельскохозяйственном поле. Основная же идея, превращающая набор изолированных точек в прототип трехмерной модели ландшафта, - это осуществление в точках схода параллельных вычислительных процессов имитации горизонтальных перетоков вещества и энергии на «надмодельном» уровне. Последнее выражается в модификации динамических переменных состояния каждого экземпляра модели, исходя из топологии пространственных точек, которым они соответствуют. Другая революционная идея заключается в использовании произвольной модели универсального характера (то есть пригодной для описания монопосевов различных культур) для моделирования смешанных посевов или многовидовых растительных сообществ. При этом на «надмодельный» уровень выносятся искусственная реализация процессов конкуренции видов, составляющих посев или сообщество, за общие ресурсы [14].

- *Использование оперативных измерений и ассимиляция данных.* Отдельный и очень непростой вопрос касается взаимодействия динамической модели и натурального эксперимента. Не вдаваясь во все многочисленные вопросы информационного обеспечения моделей опытными данными, остановимся только на одном аспекте. За более чем тридцатилетнюю историю имитационного моделирования в агроэкологии качественный скачок претерпела не только компьютерная техника, но и технологические средства измерения. Последнее подразумевает как развитие традиционной приборной базы, так и появление совершенно новых дистанционных и даже космических средств мониторинга. Многие характеристики состояния системы «почва-растение-атмосфера», традиционно относимые к внутренним переменным модели, сегодня допускают прямое оперативное измерение с практически произвольно задаваемым уровнем временного и пространственного разрешения. Причем для этого зачастую не требуется никаких специальных усилий или дорогостоящих измерений, достаточно иметь доступ к частично или полностью открытым оперативно обновляющимся базам данных дистанционного спутникового зондирования. Условно говоря, листовой индекс, коэффициент проективного покрытия или даже степень обеспеченности растений азотным питанием, прямо или косвенно определяемые из вегетационных оптических индексов, в принципе, сегодня могут считаться такими же внешними входными данными для модели, как метеорологические параметры - температура или осадки. Однако появившиеся возможности порождают ряд новых проблем. Первая из них скорее психологического свойства и может быть сформулирована как своеобразная ревность теоретиков-модельеров к экспериментальным

данным. Действительно, если многие характеристики состояния, которые традиционно вычислялись в модели с помощью уникальных «научно-технических» алгоритмов, можно не моделировать вообще, а заменить прямыми измерениями, то зачем тогда нужны процентов семьдесят логического наполнения модели? Развивая эту мысль дальше, можно прийти к вопросу: зачем нужна динамическая модель вообще? В конце концов, выбирая оперативное значение вегетационного индекса в качестве основного предиката, можно построить очень простую и очень точную регрессионную модель предсказания конечной урожайности. Вторая проблема объективна и связана с необходимостью разработки методики использования оперативно поступающих экспериментальных данных для корректировки модели в режиме «runtime», то есть непосредственно в ходе расчета. Вопрос этот не так очевиден, как кажется на первый взгляд. В качестве примера рассмотрим часто используемую методику корректировки величины листового индекса посева в моделях продуктивности сельскохозяйственных растений по данным спутниковых снимков дистанционного зондирования Земли [15]. Не вызывает сомнения, что величина листового индекса действительно может быть более-менее адекватно оценена по тем или иным индексам спектрального анализа изображения (NDVI и т. п.). Однако явная коррекция в реальной динамической модели агроэкосистемы только этого показателя для обеспечения достоверности прогнозных расчетов в течение оставшегося сезона вегетации совершенно недостаточна. Как правило, листовой индекс является не ключевой, а вычисляемой переменной состояния и пересчитывается на каждом шаге из биомассы побега. Тогда его коррекция на текущем шаге позволит, возможно, лишь более адекватно смоделировать фотосинтез на следующем шаге, после чего модель вновь вернется к исходному состоянию. Если же воспользоваться обратной зависимостью и пересчитать по листовому индексу биомассу побега, то возникает вопрос: что делать с неоднозначно связанными с ней на всех шагах расчета другими динамическими переменными – биомассой корня, физиологическим временем, влажностью почвы и другими? Таким образом, примитивная подмена модельного значения измеренным может сработать только для очень простых малопараметрических моделей регрессионного характера, но вряд ли допустима для комплексных динамических моделей агроэкосистем. Вообще говоря, вопрос оперативной коррекции текущего вектора состояния динамической модели информацией прямых или косвенных измерений представляет собой известную задачу теории автоматического управления и называется проблемой ассимиляции данных. Математическая теория ассимиляции данных получила наибольшее развитие в приложении к задачам синоптики. Безусловно, динамическое моделирование продукционного процесса растений имеет ряд специфических особенностей по сравнению с прогнозом погоды – гораздо больший разброс в семантике составляющих вектора состояния моделируемого объекта, принципиальная ненаблюдаемость системы (прямой или косвенной оценке по имеющимся наблюдениям доступна лишь малая часть переменных состояния), временная

разреженность поступления данных измерений по сравнению с шагом модели и т.д. Тем не менее, методы и алгоритмы общей математической теории ассимиляции данных после соответствующей модификации начинают все активнее применяться в практических задачах мониторинга и предсказания урожайности сельскохозяйственных посевов с использованием динамических моделей продуктивности [16].

- *Создание многофункциональных оболочек и сред исполнения моделей.* Речь в данном параграфе пойдет о деятельности, связанной с разработкой инфраструктуры моделирования, – универсальных оболочек и/или сред, поддерживающих и автоматизирующих процедуры разработки, информационного обеспечения, исполнения и анализа результатов тех или иных динамических моделей продукционного процесса. Перечислим кратко только основные задачи, которые решаются в рамках данного направления:
 1. единые универсальные оболочки (интерфейсы пользователя), позволяющие подключать к ним различные внешние модели [17];
 2. системы поливариантного анализа и автоматизации многофакторного компьютерного эксперимента [18, 19];
 3. среды структурной адаптации моделей, то есть внешние инструменты сборки конкретной версии динамической модели из отдельных изолированных модулей без перекомпиляции кода [20, 21], в том числе и с поддержкой «надмодельного» взаимодействия отдельных модулей в пространственно-распределенных моделях агентного характера [22].

Даже приведенный краткий обзор дает исчерпывающее представление о том, насколько активная деятельность наблюдается в «околомоделном» научном пространстве. Чего, как уже было сказано ранее, никак нельзя сказать о собственно разработке моделей продукционного процесса растений. На самой заре становления этого научного направления голландским ученым де Витом была предложена универсальная классификация всех будущих моделей по так называемым уровням продуктивности [23]. В русскоязычной литературе примерным аналогом этой классификации выступали принятые в рамках концепции программирования урожаев уровни обеспеченности. Уровни продуктивности «по де Виту» образуют своеобразную пирамиду Маслоу данной предметной области, задавая последовательность описаний природных процессов феноменов и явлений, которые должны быть включены в любую разрабатываемую модель агроэкосистемы по мере ее развития и усовершенствования (рис. 1).

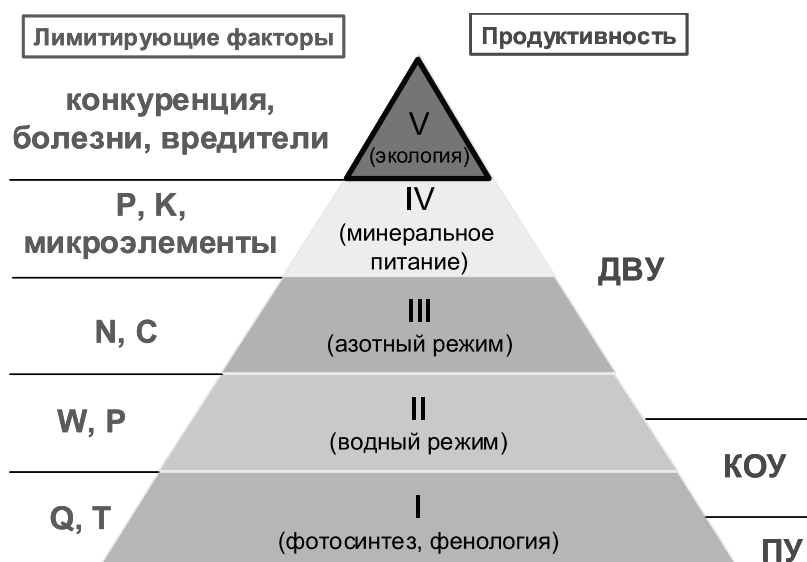


Рис. 1. Уровни продуктивности моделей

Парадокс заключается в том, что если мы посмотрим на наиболее распространенные и известные комплексные модели, существовавшие в середине девяностых годов и в настоящее время, то, несмотря на огромные различия и прогресс в вопросах сопровождения и инфраструктуры, их внутренняя логика осталась практически неизменной. Большинство из этих моделей могут быть отнесены максимум к третьему уровню продуктивности. Известных мне законченных (то есть доведенных до состояния промышленного продукта) моделей более высокого уровня не существует. Складывается впечатление, что в рамках выбранных технических и методических средств разработки (самостоятельное программирование и поточно-балансовый подход) на сегодняшнем уровне достигнут верхний предел сложности динамических моделей, при котором поведение базового вычислительного алгоритма остается хоть сколько-нибудь предсказуемым и управляемым. Причины такого состояния объективны – это «**сложность**» и «**сильная связность**» объекта моделирования.

Под «**сложностью**» понимается как внутренняя структурная сложность объекта моделирования (агроэкосистемы), так и большое количество процессов физической, химической и биологической природы, требующих адекватного математического описания для исследования изучаемых феноменов в ходе компьютерного эксперимента. Структурная и функциональная сложность приводят к тому, что создание целостной гармоничной модели личными усилиями одного исследователя становится практически невозможным. Так, модель AGROTOOL третьей версии была разработана под руководством Ратмира Александровича Полуэктова, который был одним из последних представителей уникального поколения ученых-универсалов. Он мог отвечать за каждую строчку программного кода и за все алгоритмы в каждом из логических и предметных блоков системы. С его уходом контроль над моделью в ее сегодняшнем состоянии неизбежно оказался в значительной степени утраченным.

Традиционным приемом борьбы со структурной сложностью любой информационной системы является аналитический подход, то есть декомпозиция. На настоящий момент наиболее распространены два принципиальных подхода к анализу сложных систем – функциональная (процедурная) и объектная декомпозиция. Первый подход предполагает разбиение системы на функциональные части, исходя из рассмотрения протекающих в ней процессов. При втором подходе фокус внимания смещается с функциональных на структурные составляющие, то есть система разбивается не на процессы, а на сущности [24]. Образами данных подходов в информационных технологиях выступают процедурные и объектно-ориентированные языки программирования.

В научной литературе встречается большое количество дискуссий о том, какой из вышеперечисленных подходов является более адекватным для описания такого сложного объекта, как агроэкосистема. Действительно, большинство разработанных к настоящему времени моделей состоит из функциональных блоков (рост, развитие, дыхание). В то же время здравый смысл требует признать, что агроэкосистема состоит не из транспирации и фотосинтеза, а из почвы, посева и приземного воздуха. Посев может быть разделен на корневую часть и побег, последний на листья и стебель и т.д. Этими же терминами, соответственно, должны обозначаться и составные модули программного проекта.

Еще несколько лет назад казалось, что подобные естественные и логичные соображения вкупе с развитием объектно-ориентированной методологии открывают новые перспективы борьбы с «демоном сложности» [25, 26]. Время же показало, что ни функциональная, ни объектная декомпозиция в данном случае не являются панацеей, так как объект моделирования оказывается более сложным предметом, нежели умозрительные соображения о нем. Действительно, такие *процессы*, как рост и развитие, присущи разным структурным частям посева, а дыхание имеет место и для почвенной биоты. В то же самое время изменение структуры моделируемого объекта (например, замена однослойной модели почвы многослойной) может привести к необходимости переписывания всех без исключения процессно-ориентированных модулей при традиционной процедурной декомпозиции. То же самое происходит при попытке ввести в рассмотрение любой новый фактор. Так, включение в модель некоего нового лимитирующего элемента - условно говоря, калия - неизбежно потребует переписывания множества модулей, независимо от того, получены они функциональным или структурным разбиением исходной системы на составные части.

В данном случае приходится говорить о том, что большинство протекающих в агроэкосистеме процессов, требующих своего алгоритмического описания в модели, относятся к так называемой «размазанной» функциональности, то есть к тем аспектам поведения моделируемого объекта, которые не могут быть однозначно локализованы в той или иной из составляющих его структурных частей. Иными словами, моделируемая система обладает сильной **логической связностью**. Весьма

вероятно, что адекватным инструментом анализа подобных систем может оказаться аспектно-ориентированное программирование (АОР). К сожалению, на настоящий момент еще не существует общепринятых и отлаженных технических средств, поддерживающих данную технологию.

Рецепты

Логика изложения (да и простая порядочность) требует, чтобы после мазохистского перечисления множества проблем и постановки в целом неутешительного диагноза сегодняшнему состоянию дел в нашей предметной области автором были предложены определенные пути выхода из ситуации. По крайней мере, следует упомянуть о возможных из них, дабы статья в целом не носила исключительно пессимистический характер. Ниже приводятся несколько подобных соображений и предложений разной степени оригинальности и масштабности, которые, как представляется, могут дать новый импульс и новые направления развития выбранной нами отрасли научной деятельности.

Нахождение экологической ниши для имитационных моделей. Согласно азам менеджмента (а менеджмент как универсальная наука управления проникает ныне во все уголки жизни), первое, что следует сделать, начиная очередной бизнес-проект, – определить таргет-группу потребителей конечного продукта. Классиками математического моделирования агроэкосистем были в свое время четко сформулированы задачи, которые могут решаться с помощью динамических моделей [2]. Жизнь внесла коррективы в первоначальные представления, и настоящее время – подходящий момент для того, чтобы пересмотреть данный перечень и, возможно, изменить в нем некоторые приоритеты.

Приходится признать, что ни в России, ни на Западе фермеры не стоят в очередях, чтобы приобрести себе свежую лицензионную версию модели посева и поскорее установить ее на персональный компьютер. Центральные и региональные органы планирования и управления в сельском хозяйстве прекрасно обходятся простыми, зарекомендовавшими себя регрессионными методиками (агрометеорологическими прогнозами) для получения прогнозов урожайности основных культур. Привлечение для этих же целей спутниковых снимков, пожалуй, окончательно снимает вопрос о востребованности здесь такого дополнительного и сложного инструментария, как динамические модели. Перед тем, как ставить вопрос о выборе методик исследования влияния климатических изменений на сельское хозяйство, неплохо бы разобраться с тем, каковы будут эти изменения и будут ли они иметь место вообще. Во всяком случае, при том разбросе прогнозов и сценариев, какой имеется на настоящий момент, добавление сюда еще и неопределенности результатов расчетов по множеству не до конца отлаженных динамических моделей выглядит сродни заливанию пожара керосином.

Что же тогда остается для динамических моделей в качестве их потенциальной сферы использования? Возможно, это прозвучит парадоксально, но я считаю, что это, в основном, теоретическая наука. «Модель как средство

познания действительности» - вот та конкретная роль из некогда предложенного Ратмиром Александровичем перечня, которая должна выйти на первый план и являться основным стимулом разработки новых и совершенствования существующих моделей. Безусловно, большинство специалистов-естественников до сих пор скептически относятся к перспективе ведения научного поиска при помощи компьютерного, а не натурального эксперимента. Ведь модель разработана человеком, в ней не заложено ничего другого, кроме уже известных фактов и закономерностей. Каким же образом из нее может быть «выужено» новое знание? И сказанное действительно верно для прикладных моделей утилитарного характера, то есть для моделей, созданных на базе эмпирического подхода. Но неверно в отношении так называемых теоретических или «экофизиологических» моделей, где в основу математического описания положена физическая или биологическая сущность определяющих процессов и явлений [27]. Практика показывает, что в ходе исследования подобных «наукоемких» моделей вполне могут быть выявлены новые явления или найдено оригинальное объяснение наблюдаемых в природе феноменов. В качестве примеров подобных «мини-открытий» можно привести полученные при исследовании модели эмерджентные (то есть не заложенные в модель явным образом) эффекты полуденной депрессии фотосинтеза [28], а также тайминга и микродозинга при осуществлении азотных подкормок растения «по листу» [29]. Во всяком случае, хочется верить, что соответствующие результаты действительно отражают реальность, а не являются артефактами моделирования.

И, наконец, комплексная модель агроэкосистемы с открытым интерфейсом взаимодействия между блоками может служить идеальной «оболочкой» для любой сколь угодно детальной подмодели конкретного явления или процесса, разрабатываемой и изучаемой в рамках произвольного внешнего научного проекта. Встраивая свой имитационный алгоритм в окружение базовой модели, исследователь получает возможность «проиграть» его реакции на практически неограниченном наборе внешних условий и воздействий. Ведь неоспоримым преимуществом модельного подхода остается быстрота и простота запуска на счет компьютерной программы по сравнению с проведением полевого опыта.

Кооперативная разработка. Все современные серьезные коммерческие программные продукты создаются командами профессионалов с четким распределением обязанностей между специалистами рабочей группы. Очевидно, что этот же подход неизбежно будет использован и в разработке компьютерных моделей агроэкосистем нового поколения. Более того, постоянно возрастающая логическая сложность моделей обуславливает необходимость кооперации уже на стадии математической формализации модели. Действительно, трудно представить себе разработчика, обладающего одинаково высоким уровнем знаний во всех предметных областях, имеющих отношение к продукционному процессу растений на сельскохозяйственном поле (физика почв и агрохимия, физиология растений и агрометеорология). В свою очередь, алгоритмизация и программная реализация требуют очень

серьезной компетенции во многих разделах математики (численные методы, теория управления) и современных информационных технологиях. Разработка модели более не может быть уделом «одинокого гения», но, наоборот, должна вестись сообществом специалистов, в котором четко прописаны личные обязательства и уровни ответственности. А роль лидера сообщества при этом сводится к проектированию принципиальной архитектуры модели (перечень блоков, согласование параметров их временного разрешения, спецификация интерфейса взаимодействия модулей и т.д.) и «оркестровке» бизнес-процесса кооперативной разработки. Подобный способ организации работ близок к технологии OpenSource, которая, с большой долей вероятности, станет в самом ближайшем будущем наиболее естественной методологией создания и развития новых моделей продуктивности.

На этом пути нас ждет много подводных камней. Так повелось, что большинство модельеров – это выходцы из сравнительно узких научных областей, как правило, математики или биологии по своему базовому образованию. Естественно, при создании своих моделей они уделяют большее внимание написанию формул, нежели вопросам проектирования оптимальной структуры информационной системы. В результате программирование, то есть написание кода, остается слабейшим звеном процесса разработки моделей. Между тем, настоящий момент диктует необходимость того, чтобы руководитель подобного проекта скорее был бы квалифицированным системным архитектором, нежели ученым-теоретиком. Другая серьезная проблема взаимодействия в команде – отсутствие общего языка. Это не просто метафора, отражающая тот факт, что специалисты разных предметных областей зачастую не могут понять друг друга из-за специфической терминологии, разного способа мышления и субъективных личностных особенностей, хотя все перечисленное, конечно, тоже имеет место. Но под «языком» здесь понимается, в том числе, и просто тот общий язык программирования, на котором, в конечном счете, будет написана модель. Каждый человек, когда-либо имевший дело с программированием, неизбежно имеет свои собственные предпочтения (Delphi, C++, C#, VB, Java) и, как правило, крайне негативно воспринимает попытки заставить его писать код на другом языке. И это несмотря на то, что настоящих профессионалов-программистов среди разработчиков моделей на самом деле практически нет; ясно, что обладающий подобной квалификацией специалист всегда имеет возможность найти более выгодную сферу для приложения усилий, нежели сельское хозяйство.

Тем не менее, совместная и распределенная разработка моделей представляет собой то будущее, от которого нам «не отвертеться», если в качестве выхода усилий мы намереваемся иметь конкурентоспособный научный продукт. Что же касается проблемы выработки общего языка, или, говоря глобальнее, создания общего информационного пространства внутри команды разработчиков, к ней самое непосредственное отношение имеет следующий раздел.

Использование высокоуровневых сред имитационного моделирования.

Основной посыл данного предложения формулируется очень просто: если мы

не можем выбрать одинаково приемлемый для всех членов сообщества разработчиков новой модели язык программирования, то не стоит выбирать его вообще. Идея состоит в том, чтобы отказаться от написания программного кода «с нуля», а использовать для создания моделей нового поколения тот или иной готовый высокоуровневый движок имитационного моделирования. Основной задачей здесь видится избавление разработчиков от погружения в детали алгоритмической реализации конкретных процессов. Вместо этого они могут сконцентрироваться на описании природы изучаемых явлений в более «естественном» виде, то есть, например, в виде, максимально приближенном к традиционной математической нотации.

Выбор высокоуровневой среды для разработки комплексной модели в настоящее время достаточно богат. Современный рынок предлагает большое количество профессиональных систем имитационного моделирования (PowerSim, ModelMaker, AnyLogic и т.д.) Конечно, решение отказаться от низкоуровневого программирования и перейти на разработку моделей во внешнем окружении требует преодоления серьезного психологического барьера. Кажется, что делегирование многих функций закрытому для модификации внутреннему движку среды имитационного моделирования увеличивает вероятность утраты контроля над поведением модели. Кроме того, вызывает опасение вопрос, достаточен ли предоставляемый внешними решениями функционал для реализации всех алгоритмических «фантазий» автора. До недавнего времени эти сомнения выглядели действительно оправданными. Однако сегодня уровень функциональности актуальных версий наиболее продвинутых решений в этой области таков, что может удовлетворить самые широкие претензии потенциальных пользователей. Более того, пример законченной, созданной полностью в рамках выбранной высокоуровневой среды разработки (ModelMaker) комплексной модели почвенно-биологической системы уже реализован [30].

В частности, нами давно рассматривается идея использования в качестве такого внешнего движка для реализации модели AGROTOOL следующего поколения среду имитационного моделирования AnyLogic. Она, являясь отечественной разработкой, занимает на данный момент лидирующее положение на мировом рынке систем подобного класса. Уникальной особенностью данного продукта выступает объединение в рамках одной платформы всех трех наиболее распространенных парадигм моделирования: дискретно-событийного (процессного) подхода, агентного моделирования и системной динамики. На настоящий момент очевидны следующие возможные выгоды от использования этой платформы при создании модели производственного процесса растений:

1. Возможность описания динамических процессов различной природы в единой стандартизованной и общеупотребительной графической нотации, что облегчает междисциплинарное общение внутри сообщества разработчиков.
2. Применение методов системной динамики, то есть описание систем дифференциальных уравнений «как есть», позволяет в идеале отказаться

от явной и жесткой временной дискретизации модели. Традиционные понятия «модель с суточным шагом», «модель с декадным шагом» при использовании данного подхода теряют смысл. С точки зрения разработчика и пользователя, интегрирование уравнений динамики системы при расчете модели происходит *в непрерывном времени*. Методика сведения дифференциальных уравнений к разностным оказывается внутренним делом специально заточенного на это движка моделирования. На практике последнее должно позволить избежать большого количества технических и алгоритмических ошибок, неизбежно проявляющихся при «ручной» дискретизации динамической модели.

3. В отличие от своих аналогов (PowerSim, ModelMaker и др.), среда AnyLogic на всех этапах разработки предоставляет пользователю достаточно тесную связь с исходным кодом проектируемого приложения на языке Java. Это позволяет, с одной стороны, при необходимости реализовать любые сколь угодно сложные алгоритмические и семантические конструкции на более низком уровне, а с другой – обеспечивает изоляцию полученной разработки от среды проектирования, то есть возможность запуска полученной модели на любом компьютере с установленной виртуальной Java-машиной.
4. Использование платформы AnyLogic открывает перед разработчиком широкие возможности для использования встроенных в среду готовых инструментов информационного обеспечения динамических моделей: алгоритмических библиотек, визуальных интерфейсных решений, провайдеров для связи с внешними источниками данных, интеграции с ГИС, механизмов параметрической идентификации, анализа чувствительности, оптимизации управляющих воздействий и т.д.

Заключение

Данная статья озаглавлена несколько претенциозно. Автор сознает, что и большинство оценок, данных им сегодняшнему состоянию дел, и предложенные решения носят спорный и субъективный характер. Тем не менее, в заключении следует дать ответ на вопрос, вынесенный в название. Безусловно, **я не считаю, что мы находимся в тупике**. В противном случае, зачем продолжать заниматься тем, чем мы, так или иначе, занимаемся уже более четверти века? Мы находимся на распутье. И, на самом деле, не столь важно, какой путь будет нами избран: ответ на вопрос, верна ли дорога, во-первых, даст время, а во-вторых, он в любом случае также окажется зависящим от субъективного восприятия. Главное – не стоит стоять на месте.

Литература

1. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. М., Гидрометеиздат, 1981. 166 с.
2. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. Л., Гидрометеиздат, 1991. 312 с.
3. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л., Гидрометеиздат, 1977. 199 с.

4. Сиротенко О.Д., Абашина Е.В. Математическая модель роста и развития растений на уровне фитомеров // Физиология и биохимия культурных растений. 1985. Т. 17, 166–174.
5. Ризниченко Г.Ю. Математические модели в экологии в СССР // Материалы Третьей Национальной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии», 21-25 октября 2013 г. Пушкино, ИФХиБПП РАН, 2013.
6. Пелевин В. Шлем ужаса: Креатифф о Тесее и Минотавре. М.:Открытый Мир, 2005. 225 с.
7. Пачепский Я.А. и др. Абстрагирование и комплексирование как подходы к преодолению неопределенности и множественности моделей влагопереноса в почве (в данном сборнике)
8. Simpson T., Peplinski J., Kock P., Allen J. Metamodel for computer based engineering designs: survey and recommendations. // Engineering with Computers 17, 2001, P. 129–150.
9. Eberlein R.L. Simplification and understanding of models // System Dynamics Review, V.5, 1989, P. 51-68.
10. Александров В.Г., Топаж А.Г. Принципы построения и перспективы использования ОДУ-аппроксимаций динамических моделей агроэкосистем // Агрофизика, 2013, т.11. С. 31-36.
11. Менжулин Г.В. Анализ достоверности и точности современных модельных сценариев изменений глобального климата, рекомендованных в 4-ом отчете МГЭИК // Материалы Всеросс. конф. (с международ. участ.) "Методы оценки сельскохозяйственных рисков и технологии смягчения последствий изменения климата в земледелии", 13-14 октября 2011 г., Санкт-Петербург. СПб., Изд-во ГНУ АФИ Россельхозакадемии, 2011. С. 43-46.
12. Mirschel W, Poluektov R.A., Schultz A, Oparina I.V., Fintushal S.M., Topaj A.G., Hofflich G. Adaptation of Agroecosystem Models AGROSIM, AGROTOOL and CERES to Central and Eastern European locations using German and Russian data-sets // In “Perspectives of Modern Information and Communication Systems in Agriculture, Food Production and Environmental Control” - Proc. of Second European Conference of the European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment, September 27-30, 1999, Bonn, Germany, vol. B, P. 775-779.
13. Гавлин А.В., Топаж А.Г. Параллельные синхронизированные вычисления — первый шаг к построению прототипа модели агроландшафта // Материалы Международной конференции «Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося климата (к 80-летию Агрофизического НИИ)». Санкт-Петербург, 20–21 сентября 2012 г. СПб., Любавич, 2012. С. 486-489.
14. Confalonieri R. CoSMo: a simple approach for reproducing plant community dynamics using a single instance of generic crop simulators // Ecological Modeling, 286, 1-10.
15. Клещенко А.Д., Найдина Т.А. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования физиологических процессов растений в

- динамических моделях прогнозирования урожая // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 170-178.
16. Olioso A. и др. Future directions for advanced evapotranspiration modeling: Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models // *Irrigation and Drainage Systems*, 2005, v. 19, P. 377-412.
 17. Acock, B., Pachepsy, Y.A., Mironenko, E.V., Whisler, F.D., Reddy, V.R., 1999. GUICS: A Generic User Interface for On-Farm Crop Simulations. *Agronomy Journal* 91, 657–665.
 18. Medvedev S., Topaj A., 2011. Crop simulation model registrator and polyvariant analysis. *IFIP_Advances in Information and Communication Technology*. v.359, AICT. 295-301.
 19. Jones, J., Hoogenboom, G., Porter, C., Boote, K., Batchelor, W., Hunt, L., Ritchie, J., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 235–265.
 20. Gregersen, J.B., P.J.A. Gijsbers, and S.J.P. Westen, OpenMI: Open Modelling Interface, *Journal of Hydroinformatics*,. 9(3), 175-191, 2007.
 21. Confalonieri R., и др. An extensible, multi-model software library for simulating crop growth and development. In: *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software, Managing Resources of a Limited Planet, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany*, R. Seppelt, A.A. Voinov, S. Lange, D. Bankamp (Eds.)
 22. Bezrukova, M., V. Shanin, A. Mikhailov, N. Mikhailova, Yu. Khoraskina, P. Grabarnik, A. Komarov, 2012. DLES – a component-based framework for ecological modelling. In: *Jordán, F., and S.E. Jørgensen, Models of the Ecological Hierarchy from Molecules to the Ecosphere*. Elsevier, 331-350.
 23. 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.
 24. Буч Г., и др. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений (UML 2). Третье издание = *Object-Oriented Analysis and Design with Applications (3rd Edition)*. — М.: «Вильямс», 2010. — 720 с.
 25. Poluektov R.A., Topaj A.G. Crop Simulation: new Tasks vs. new Abilities // In: *Proc. of International Conference «Sustainable Development in Information Society»*, October 2-4, 2000, Vilnius, Lithuania, P. 32-36.
 26. Van Evert F.K., Campbell G.S. CropSyst: a collection of object-oriented simulation models of agricultural systems // *Agronomy Journal*, 1994, 86 (2). pp. 325-331.
 27. Полуэктов Р.А., Топаж А.Г., Миршель В. Сравнение эмпирического и теоретического подходов в моделировании агроэкосистем на примере фотосинтеза // *Математическое моделирование*, 1998. Т.10, №7. С.25-36.
 28. Топаж А.Г., Гурин П.Д. «Минималистичная» модель водного режима растения // *Материалы Третьей Национальной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии»*, 21-25 октября 2013 г. Пущино, ИФХиБПП РАН, 2011. С. 251-253.

29. Гурин П.Д., Захарова Е.Т., Топаж А.Г. Алгоритм подбора оптимальных сроков внесения и уровня доз азотных удобрений и подкормок в рамках имитационной модели AGROTOOL // Материалы Международной конференции «Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося климата (к 80-летию Агрофизического НИИ)». Санкт-Петербург, 20–21 сентября 2012 г. СПб., Любавич, 2012. С. 494-496.
30. Müller С. Modelling soil-biosphere interactions. CABI Publishing, 1999, New York, 300 p.