

МЕЛИОРАЦИЯ

УДК 626.86.001.57

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РЕКОНСТРУКЦИИ

Н.К. Вахонин, кандидат технических наук
Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси

Ключевые слова: реконструкция, методология проектирования, оптимизация мелиоративных систем, оптимизационно-имитационное моделирование осушительного действия, моделирование урожая

Введение

Стадии первоначального мелиоративного строительства эпохи СССР соответствовали экономические условия того периода, уровень изученности процессов динамики воды при осушении, ограниченные вычислительные возможности, связанные с неразвитостью компьютерной техники, что предопределяло особенности методики принятия решений при мелиорации и сельскохозяйственном использовании.

В основном выбор решений относился к стадии проектирования мелиоративной системы. При этом большая часть проектных процедур осуществлялась по нормативным показателям (выбор типа, структуры мелиоративной системы и значительной части ее параметров), а рассчитывались главным образом только параметры поперечного сечения проводящей сети (глубина каналов, диаметры коллекторов) и расстояния между регулирующей сетью [1].

В большинстве случаев мелиоративные объекты проектировались с параметрами, которые обеспечивали осушение для любых вариантов сельскохозяйственного использования. Ограничения на сельскохозяйственное использование вводились только для торфяных почв, но не из-за формирования водного режима мелиоративной сетью, а из экологических требований преимущественного использования их под травы для уменьшения интенсивности сработки.

В соответствии с нормативными сроками окупаемости назначалась "программируемая" урожайность, позволяющая их обеспечить при принятом варианте севооборота. Очевидно, что принятая фактически нормативно урожайность могла в реальности и не достигаться, но установить причины этого в связи с многофакторностью и стохастичностью урожайности по годам не представляется возможным.

В связи с дефицитом сельхозпродукции и наличием значительных ресурсов сельхозиспользование ориентировалось на максимум продуктивности, а мелиоративные системы – на максимальное техническое совершенство, обеспечивающее максимальное их быстрое действие.

В результате расчет параметров мелиоративных систем осуществлялся на критерии технического уровня, а сельхозиспользование не зависело от их величины.

Для осуществления ручного счета сложные процессы динамики воды предельно упрощались. Это достигалось, прежде всего, разрывом расчетов проводящей и регулирующей сети и проведением их для одной временной точки – критического периода, которым в условиях Беларуси является весеннее половодье (в некоторых случаях – летне-осенние паводки). Изменчивость его по годам учитывалась за счет введения понятия расчетной обеспеченности модулей стока, принимаемой нормативно. Для расчетов параметров каналов и междренних расстояний использовались зависимости, предельно схематизированно учитывающие реальные условия (равномерное, установившееся, одномерное (нульмерное) движение воды): формула Шези, используемая для расчета русловых потоков и различные формулы междренних расстояний, основанные на законе Дарси.

Запроектированные таким образом параметры фактически могут обеспечивать удовлетворение только реально закладывавшимся в расчет требованиям: обеспечение пропуска каналами расчетного расхода критического периода с заданным нормативно уровнем воды от бровок, понижение УГВ в критический период от исходного уровня до нормы осушения в требуемые сроки. Очевидно, что при этом остается не определенным действительное формирование водного режима на протяжении всего остального периода и, соответственно, реально формируемая урожайность и экономические показатели.

Наиболее остро эти проблемы проявились в современных экономических условиях при изменившихся в результате старения параметрах мелиоративных систем. В связи с вышеизложенным прежняя методика проектирования и использовавшиеся в ней зависимости не позволяют оценить эффективность систем в текущем состоянии и выбрать оптимальный вариант их изменения, что требует разработки принципиально новых подходов.

На основании рассмотрения главных проблем системного анализа отграничения системы от внешней среды и формирования системы целей применительно к мелиорации в качестве функционально полной системы выделен мелиорированный сельскохозяйственный объект (МСХО), включающий четыре неразрывно связанные протекающими процессами и единством целей подсистемы: мелиоративная сеть (МС), мелиорируемые земли (МЗ), сельскохозяйственная растительность (СХР) и изменяемая окружающая среда (ИОС).

В качестве целостной системы целей для МСХО выступают: максимум дохода, минимум затрат, минимум негативных изменений в окружающей среде. Эти цели имеют неопределенность, связанную со стохастичностью входных погодно-климатических условий, в связи с чем соответствующие им критерии могут формироваться в различном виде: максимум матожидания, минимум дисперсии, стохастическое ограничение и т.п. [2-4].

При этом для МСХО имеет место фактически одна глобальная задача принятия решений: выбор оптимальных по вышесформулированным критериям вариантов из альтернатив, имеющих во всех его подсистемах на различных этапах жизненного цикла.

При этом выбор любых решений, соответствующих различным этапам жизненного цикла МСХО, должен осуществляться по единой схеме: многовариантные расчеты в цепочке *альтернативный вариант – соответствующее ему развитие процессов – складывающиеся при этом значения критериев и выбор из них оптимального* (рис.1).

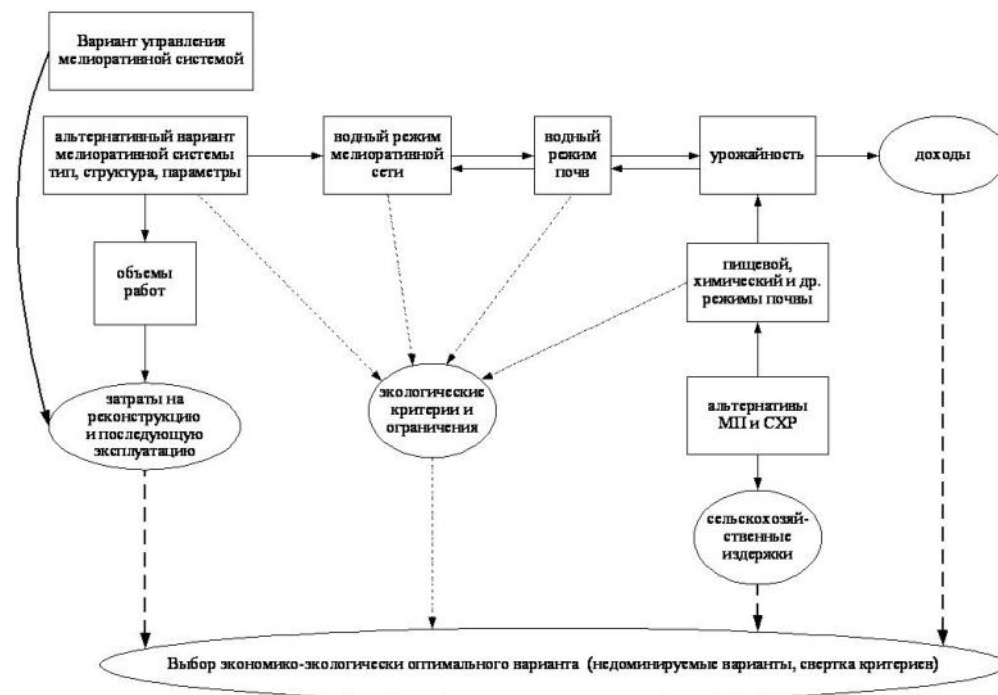


Рис. 1. Схема принятия решений на мелиорированном сельскохозяйственном объекте на всех этапах его жизненного цикла

По уровню крупности, величине необходимых затрат и возможного изменения доходов, задачи принятия решений можно разделить на: выбор ежегодных воздействий в различных подсистемах (управление водным режимом, эксплуатация МС, используемые дозы удобрений) и более редко осуществляемые трансформации системы – согласованный выбор варианта реконструкции мелиоративной системы под существующее сельхозиспользование или выбор варианта изменения сельхозиспользования под водный режим, складывающийся в соответствии с имеющимся состоянием системы. При этом принятие наиболее ответственных и капиталоемких решений по трансформации системы можно подразделить на две стадии: установление необходимости и выбор типа трансформации (реконструкция, смена сельхозиспользования) и далее детальный расчет показателей для выбранного варианта (проектирование реконструкции, планирование севооборотов).

Очевидно, что принятие решений во всех выделенных выше задачах и их стадиях взаимообусловлено, и в идеале для выбранного варианта в одной подсистеме необходимо просчитывать эффективность при всех вариантах альтернатив в ней самой и в других

подсистемах, во всей их иерархии: от глобальных вплоть до самых частных. Например, для каждого принятого (существующего) варианта севооборота идеальным является определение эффективности при различных типах мелиоративных систем, включая всевозможные варианты их структуры и значений параметров проводящей и регулирующей сети, а также различные варианты управления водным режимом при этом. Аналогично для каждого принятого (существующего) варианта мелиоративной сети идеальным является расчет эффективности всех альтернативных вариантов севооборотов, соответствующих различным иерархическим уровням: концепция сельхозиспользования (предельная адаптация каждой культуры к свойствам полей – подбор для каждого поля наиболее соответствующей ему культуры или групповая адаптация к свойствам полей – выбор числа отдельных севооборотов на землях хозяйства и их состава); тип севооборота (временной или пространственно-временной); вид севооборота (по числу полей, по типам, видам, сортам культур); интенсивность выращивания (дозы удобрений, средства защиты и т.п.).

Очевидно, что в целом в МСХО имеется бесконечно большое количество возможных альтернативных вариантов. Множество альтернатив может быть сужено за счет эвристического (экспертного) исключения из оценки "заведомо" неэффективных решений, что достигается введением нормативных ограничений на процессы и параметры, обеспечивающие устойчивость системы к разрушению (неразмывающие, незаиляющие скорости, уклоны и т.п.), а также ограничений на параметры и процессы по экологическим соображениям и т.п. Однако и после этого анализ большого числа остающихся альтернатив в иерархии от стратегических до наиболее мелких остается проблематичным. В связи с этим неизбежна декомпозиция общей задачи на вышеупомянутые локальные, соответствующие отдельным этапам жизненного цикла [3, 4]. При этом следует подчеркнуть, что во всех этих задачах выбор альтернатив во всех подсистемах единой системы (МСХО) должен осуществляться на удовлетворение одному и тому же набору вышесформулированных экономико-экологических критериев. При этом для получения точных решений локальные и координирующая задача должны решаться в несколько итераций. В частности, принятое на стадии бизнес-планирования решение о виде трансформации (реконструкция, переспециализация) на следующей стадии детализации: при осуществлении проектных расчетов, может быть уточнено или даже изменено.

При принятии решений по трансформации систем перебор альтернатив во всей их иерархии в каждой из подсистем (активных стратегий по реконструкции мелиоративной сети, вплоть до конкретных параметров ее осуществления и адаптивных стратегий по изменению вида и интенсивности сельхозиспользования) в общем случае может осуществляться в любой последовательности, выбор которой не принципиален для окончательных результатов расчетов. Очевидно, однако, что базовым вариантом для сравнения при принятии решений о трансформации систем является анализ действующего варианта системы (мелиоративной сети и вида сельскохозяйственного использования), а в

условиях ограниченных ресурсов в первую очередь должны рассматриваться менее капиталоемкие, в сравнении с реконструкцией, варианты трансформации сельскохозяйственного использования мелиорированных земель.

Очевидно, что действительную мотивированность в выборе эффективных решений имеет непосредственно само хозяйство-землепользователь. Поэтому принятие таких решений в конечном итоге должно являться его прерогативой и главной задачей. Однако в связи с отсутствием в хозяйствах специалистов необходимой для проведения таких сложных расчетов квалификации, для бизнес-планирования сельхозиспользования, проектирования реконструкции мелиоративных систем целесообразно использовать специализированные организации на условиях консалтинга. Но при этом основное информационное обеспечение, необходимое для осуществления таких расчетов, должно формироваться непосредственно в самом хозяйстве. В качестве минимально необходимой системы мониторинга при этом выделяется книга истории полей севооборота, в которой должны храниться осуществляемые и фиксируемые непосредственно в самих хозяйствах-землепользователях воздействия (вносимые дозы удобрений, средств защиты растений и т.п.) и получаемые урожаи по каждому полю. При этом в связи с большими объемами наблюдаемых и необходимых для анализа данных книга полей севооборота должна вестись в автоматизированном виде, без чего происходит их быстрая утеря и использование собранной информации в многовариантных расчетах невозможно. С учетом большой пространственной распределенности параметров и процессов книгу истории полей целесообразно организовывать на базе геоинформационной системы: пространственно привязанный на электронной карте тематический слой всех полей хозяйства с хранением соответствующей им информации по мелиорированности, проведению реконструкции, урожаям и другим показателям за различные годы в атрибутивной таблице.

Для выделения государственных инвестиций на осуществление реконструкции, имеющей большие удельные затраты (1500-2500 долл. США/га), хозяйством должен представляться бизнес-план – заявка на реконструкцию. Его обоснованность возможна только при наличии достоверной информации, которая необходима также при непосредственном проектировании систем под реконструкцию. Получить такую информацию без ведения автоматизированной книги истории полей невозможно. В связи с этим целесообразно обусловить выделение хозяйству инвестиций на реконструкцию (признание бизнес-плана обоснованным) только при условии ведения книги истории полей. По крайней мере, хозяйствам, ведущим такую книгу, инвестиции должны выделяться в первую очередь, так как это свидетельствует об их рачительности, что дает надежду на окупаемость вложений.

Дополнительная, необходимая для различных задач, информация может привлекаться и из других осуществляющих различные виды мониторинга организаций и ведомств (рельеф – землеустроительные службы и проектные мелиоративные организации, метеоданные – Гидрометслужба, почвенные характеристики – землеустроительные

службы, агрохимслужба и т.д.). При этом хранение мониторинговых данных целесообразно организовывать в специализированной базе данных временных рядов, взаимосвязанной с геоинформационной системой, что обеспечивает возможность формирования структур данных, необходимых для различных моделей.

При оценке необходимости проведения трансформации мелиоративной системы для исключения влияния изменяющихся по годам цен и установления эффективности функционирования непосредственно самой системы необходим анализ формируемых на ней урожаев. Учитывая стохастичность погодно-климатических воздействий, а соответственно, случайную изменчивость величин урожаев, для оценки состояния МСХО целесообразно использовать не непосредственно зафиксированные значения урожаев, а рассчитываемую величину скользящей средней урожайности по годам, являющейся сглаживающим фильтром, показывающим наличие тренда на фоне случайных колебаний. При этом в связи с различными по годам используемыми дозами удобрений для получения инвариантной величины вместо абсолютных урожаев может быть использована относительная их величина – урожай на килограмм удобрений $У/\Sigma\text{NPK}$ (рис. 2).

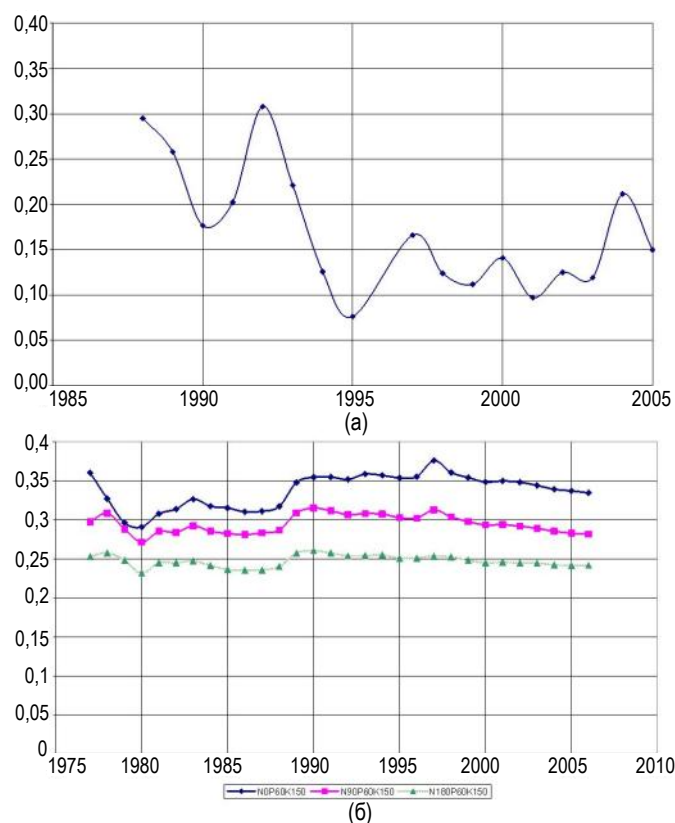


Рис. 2. Изменение по годам удельной урожайности зерновых $У/\text{NPK}$ в ОАО "Журавлиное" (а) и скользящие средние удельные урожаи трав на сено на осушенных мелкозалежных торфяниках на Пружанском стационаре (б)

Однако окончательное решение по выбору варианта трансформации и при решении других вышеупомянутых задач заключается в последовательном анализе альтернатив в соответствии со схемой (рис. 1) и выборе из них оптимальной. В соответствии с этим принятие решений на МСХО представляет собой решение задачи (ряда задач) оптимизации на удовлетворение сформулированным выше экономико-экологическим критериям.

Выбор оптимального варианта параметров систем может осуществляться на основе двух подходов: а) проведения натуральных экспериментов с различными вариантами систем; б) осуществления численных экспериментов с использованием оптимизационно-имитационной модели, с той или иной степенью параметризации, описывающей взаимосвязи в цепочке (рис.1) *альтернативный вариант – процессы – критерии*.

Необходимость использования переборных алгоритмов (численных экспериментов) при проектировании обуславливается чрезвычайной сложностью МСХО, не позволяющей без потери точности упростить модель до уровня, обеспечивающего возможность непосредственного нахождения оптимального варианта с использованием классических методов оптимизации (линейное, динамическое программирование и т.п.).

Недостатком эмпирического подхода является большая капиталоемкость (необходимо осуществлять даже не многовариантное проектирование, а многовариантное строительство), что резко ограничивает возможное число сравниваемых вариантов при существующей необходимости анализа бесконечно большого их числа. К тому же на одном объекте может быть реализован только один вариант мелиоративной системы, а для остальных сравниваемых вариантов необходим подбор участков с аналогичным комплексом природно-климатических условий и доказательство их идентичности, что весьма проблематично. Поэтому выбор оптимального варианта мелиоративной системы на основе натурального сравнения различных альтернативных вариантов мелиоративных систем нереален. Сравнение различных ранее построенных систем позволяет только осуществить в самых общих чертах оценку их преимуществ и недостатков в различных выделенных типизированных природно-климатических зонах.

Возможны два варианта использования результатов натуральных экспериментов: непосредственное сравнение и выбор лучшего из реализованных вариантов или же использование полученных в ограниченном числе вариантов натуральных экспериментов результатов по количественно измеримым показателям не для непосредственного сравнения, а для получения эмпирических зависимостей с различным уровнем генерализации аргументов (все более "черный ящик"), используемых затем в оптимизационных моделях для выбора оптимального варианта.

Например, использование результатов опытов по зависимости урожайности от дозы удобрения не для непосредственного выбора оптимальной дозы, а для аппроксимации экспериментальных точек функциональной зависимостью формально принятого

типа, используемой затем для нахождения оптимального значения, определяемого посредством приравнивания к нулю ее производной.

В более сложном случае, в частности при проектировании мелиоративных систем, получаемые таким образом зависимости могут использоваться в качестве составляющих общей модели оптимизации.

Поэтому при осуществлении оптимизации на основе второго подхода - использования математических моделей в них могут быть задействованы как феноменологические уравнения, как правило, основанные на законах сохранения, так и зависимости, полученные на основе обработки данных натуральных экспериментов.

Важно подчеркнуть, что оптимизационные модели имеют прагматический смысл, и для них важна не физическая обоснованность используемых зависимостей, а обеспечиваемая точность выбора оптимального варианта при минимальных затратах на его осуществление.

Однако необходимо учитывать, что в моделях принятия решений должны использоваться зависимости, параметры и входные воздействия в которых после создания системы не изменятся (имеющие слабые обратные связи с внешней средой), что обеспечивает необходимую точность расчетов. В этом отношении параметризованные эмпирические зависимости, как правило, имеют эмпирические коэффициенты, которые заведомо изменятся после строительства систем, что снижает точность оптимизационных расчетов при их использовании в сравнении с феноменологическими моделями.

Для каждой задачи оптимизации могут использоваться различные классы уравнений с различной степенью детальности (параметризации), описывающие взаимосвязи в цепочке *альтернативный вариант – соответствующие ему водный и другие режимы – урожай*. В результате модель принятия решений сама является альтернативной. Выбор конкретного ее варианта возможен только на основании сформулированного положения о целеориентированности модели принятия решений [3, 4]: оптимальной является вариант модели, который удовлетворяет сформулированным экономико-экологическим целям оптимизируемого с ее помощью МСХО с учетом затрат на принятие решений, включая разработку модели, создание информационного обеспечения и осуществление расчетов. В соответствии с этим выбираемые для моделирования уравнения должны быть не изошренными, со все большей детальностью описывающими все: и сильно, и слабо влияющие процессы, что делает невозможным сбор необходимого информационного обеспечения и осуществление расчетов, и не упрощенными до возможности решения в квадратурах, так как для этого основными реально влияющими факторами обычно приходится пренебрегать, в результате чего осуществление расчетов теряет смысл. Уравнения должны быть адекватными – с согласованной точностью описывающими основные, влияющие на функцию цели, процессы таким образом, чтобы при минимальных затратах на моделирование и сбор необходимой информации обеспечить максимальный

доход от осуществления более точного выбора варианта проектируемой системы. Очевидно, что выбор оптимальной модели до конца неформализуем в принципе и в значительной степени базируется на эвристических соображениях.

При оптимизации параметров в подсистеме мелиоративная сеть (проектирование реконструкции МСХО) непосредственное натурное сравнение различных их вариантов нереально из-за очень ограниченных возможностей реализации при огромном числе альтернатив. Поэтому оптимизация должна осуществляться на основе моделирования формирования водного режима при различных вариантах параметров осушительной и проводящей сети. При этом процессы динамики воды в грунте и водотоках в модели могут описываться уравнениями различного типа: от эмпирических зависимостей типа "черного ящика", продолжая балансовыми уравнениями с сосредоточенными параметрами и наиболее строгими, адекватными обычно имеющемуся уровню информационного обеспечения, дифференциальными уравнениями с распределенными параметрами, основанными на законах сохранения. Для мелиоративной сети это система уравнений гиперболического типа Сен-Венана, для грунта – дифференциальное уравнение параболического типа Буссинеска.

Дальнейшее усложнение уравнений в направлении еще более строгого соответствия описываемых процессов реальным условиям, например, использование для описания динамики воды в грунте трехмерного дифференциального уравнения влагопереноса или системы дифференциальных уравнений фильтрации двухкомпонентной водовоздушной среды с учетом фазовых переходов [5] нереально из-за сложности получения данных для их точного решения. Следует отметить, что сбор информационного обеспечения является дорогостоящим, а для мелиоративных задач, связанных со случайными погодно-климатическими воздействиями, еще и требующим продолжительных лет проведения. В связи с этим выбор возможной модели принятия решений зачастую лимитируется наличием уже имеющихся данных, необходимых для ее идентификации.

В связи с неразрывностью водной среды уравнения динамики грунтовых и русловых вод должны решаться совместно. При этом для каждого разыгрываемого варианта параметров мелиоративной системы (глубины каналов, расстояний между осушителями) должен осуществляться непрерывный расчет на многолетие, используя в качестве стохастических входных метеорологических и гидрологических воздействий значения, разыгранные методом Монте-Карло на основе имеющихся рядов предшествующих наблюдений. Непрерывный, а не на отдельный критический период, как в прежних нормах проектирования, расчет водного режима, формируемого мелиоративной системой, принципиально по-новому представляет характер ее осушительного действия.

Имеющий место в Беларуси годовой ход основных определяющих увлажненность составляющих характеризуется преобладанием в летне-осенний период испарения над осадками. В этих условиях мелиоративная система работает не только как ликвидирующая

уже сложившееся избыточное увлажнение (осушение в критический период, которым обычно является весна), но в значительной степени как предупредительно-осушающая: создающая вместе с испарением в летне-осенний период аккумулирующую емкость, за счет которой снижается величина возможной избыточной увлажненности и необходимые сбросы воды в предстоящий критический период. Соответственно, это уменьшает необходимую интенсивность работы системы в критический период, причем очевидно, что "предосушающее" действие определяется типом системы и ее параметрами. Неучет этого и расчет параметров при проектировании первоначального строительства в предположении исходных УГВ от поверхности земли (что в действительности имеет место только в первый год осушения болота и то, если он не засушливый, так как в годы с дефицитом увлажнения УГВ на болотах могут опускаться на глубину 60 см и более, что, в частности, отмечалось летом 2006 г. и в другие засушливые годы на неосушенном болоте на Пружанском стационаре) приводил к принятию их с большими коэффициентами запаса на осушение.

На осушительно-увлажнительных системах поддержание высоких УГВ в летний период уменьшает "предосушающее" действие сети, что ведет к увеличению рисков переувлажнения в случае выпадения ливневых осадков. При этом избыточное увлажнение может складываться даже более критическим, чем в весенний период. С учетом этого на осушительно-увлажнительной системе больше вероятность переувлажнения, и при прочих равных условиях для обеспечения одинакового уровня осушения мелиоративная сеть на ней должна иметь большее быстроедействие, чем на чисто осушительной системе. Следует отметить, что главную осушительную роль в период летней межени играет глубина проводящих каналов, так как за продолжительный период "предосушения" (80-100 дней и более) УГВ зачастую понижаются до уровня их дна, тогда как при расчете на короткий (5-10 дней) критический период большую роль играет расстояние между осушителями. Однако и в этот период интенсивность осушительного действия (ресурс регулирования) определяется перепадом между уровнями грунтовых вод и уровнями воды в канале.

Очевидно, что при значительном снижении и выполаживании поверхности грунтовых вод и соответствующем уменьшении стока до величин, значительно меньших испарения, нет необходимости продолжать осуществлять расчет водного режима по системе уравнений с распределенными параметрами и можно переходить на использование уравнения с сосредоточенными параметрами, отражающего водный баланс не для бесконечно малого участка, а для поля осушения в целом:

$$\mu \frac{dH}{dt} = Q_{oc} - I_{oc} - Q_{ст} + Q_{нап} = Q_{oc} - I_{oc} \left[\frac{H - H_{кан}}{H - H_{нап}} \right] \pm \beta \left[\frac{H - H_{нап}}{H - H_{нап}} \right] \quad (1)$$

Входящие в балансовое уравнение потоки I_{oc} , $Q_{ст}$, $Q_{под}$ могут быть представлены эмпирическими зависимостями одного из четырех возможных типов [4], в линейном приближении имеющих вид (1).

Для последующего выбора лучшего варианта параметров мелиоративной сети по рассчитанному для каждого из них водному режиму почв должна быть определена соответствующая ему урожайность. Для этого необходима модель урожая в зависимости от водного и других влияющих на него режимов (пищевого, теплового и т.д.). В строгой постановке моделирование урожая является значительно более сложной проблемой, чем моделирование динамики воды в системе осушаемое поле – мелиоративная сеть. В первую очередь это связано с необходимостью, помимо описания достаточно хорошо изученных физических процессов движения воды и связанных с ней процессов динамики питательных элементов и тепла, включать в модель зависимости для описания значительно более слабо изученных биофизических и биохимических процессов (фотосинтез, дыхание растений, образование и перемещение ассимилятов, формирование и развитие органов и т.п.), протекающих в растениях.

Уже одно то, что растение является биологическим организмом, имеющим изменяющиеся в процессе роста параметры, на порядок усложняет расчет даже хорошо изученных процессов динамики воды и переноса с ними питательных элементов при их использовании для описания потоков в растении от корней через стебель к листьям, так как требует знания (моделирования) динамики зависящих от биологических процессов развития растений параметров, определяющих их водопропускную и водовмещающую способности.

В строгой постановке конечная величина урожая должна определяться на основании динамической модели его нарастания в течение всего периода вегетации [6-9].

При этом, так как урожайность складывается из продуктивности отдельных дискретных растений, очевидно, что в детальной постановке динамическая модель должна применяться отдельно к каждому из них. В общем случае она должна обеспечивать расчет в процессе вегетации количества хозяйственно полезных органов растения, количества зерен (клубней) в каждом из них, нарастание их массы в совокупности определяющих урожай каждого отдельного растения в конечной точке траектории его развития, что требует одновременно моделировать и развитие всех остальных органов растения (листьев, корней, стеблей и т.д.).

Для перехода от единичного растения к общей урожайности с единицы площади должно быть известно число растений на ней, для чего необходимо моделирование на уровне сообщества отдельных растений, причем с учетом конкуренции между собой, а также с сорняками.

Наиболее сложной проблемой моделирования растения на уровне динамики сплошной среды является неопределенность функции цели, которую реализует управляющий орган растения – устьице, степенью открытия которого одновременно регулируется протекание всех основных определяющих нарастание урожая процессов (водного, пищевого, теплового, фотосинтеза). Степень открытия устьица определяет величину

испарения, а соответственно, интенсивность перемещения воды от корней к листьям и перенос ею питательных элементов. Одновременно величина испарения, определяемая степенью открытия устьица, регулирует тепловой режим. Помимо потока пара, степень открытия устьица регулирует встречный поток поступления CO_2 в листья и, соответственно, интенсивность процесса фотосинтеза. Остается неизученным вопрос: решение какой задачи осуществляет растение (какую функцию цели преследует), регулируя степень открытия устьиц в стрессовых условиях внешней среды, так как при этом улучшение ситуации по одному фактору зачастую ухудшает условия по другим. Например, при пониженных температурах для улучшения своего теплового режима растение должно снижать испарение, для чего должно уменьшаться открытие устьиц. Однако одновременно это приведет к уменьшению потока влаги от корней и, соответственно, уменьшению поступления с ней элементов питания, а также уменьшению поступления CO_2 из атмосферы и скорости фотосинтеза. Степенью раскрытия устьица растение реализует некоторый компромисс неблагоприятного изменения этих процессов

В связи со сложностью вышеизложенных процессов, известные теоретические модели [6-9] (в действительности являющиеся таковыми в основном только в части описания физических процессов, а в биологической части главным образом эмпирические) даже на уровне расчета нарастания биомассы одного растения для осуществления решения требуют идентификации нескольких десятков нефизических параметров, что нереально. Однако этим сложности не ограничиваются, так как для получения достоверных решений одновременно с моделированием сельскохозяйственных растений аналогичным образом должна моделироваться динамика популяций сорняков, а также вредителей и болезней при формирующихся погодно-климатических условиях, в конкуренции и борьбе с которыми определяется количество и развитие отдельных сельскохозяйственных растений на единице площади, определяющее конечное значение урожайности.

В то же время моделирование этих процессов имеет уровень сложности даже больший, чем моделирование сельскохозяйственных растений, и к тому же требует дополнительно идентифицировать еще несколько десятков эмпирических коэффициентов.

Моделирование урожая без учета этих сильно влияющих биологических факторов не может обеспечить надежные результаты.

Таким образом, из вышеприведенного очевидно невозможность использования "теоретических" динамических моделей для расчета урожая при решении практических задач оптимизации параметров мелиоративных систем при реконструкции, оптимизации сельскохозяйственного использования земель и т.д.

Качественно упрощающим феноменологические модели является переход от определения урожая на основе динамического нарастания биомассы растения (и его хозяйственно полезных органов) и их числа на единице площади на протяжении всего периода вегетации, к соотношениям (статистическим зависимостям) для определения об-

щей урожайности непосредственно в конечной точке траектории периода вегетации, в зависимости от определяющих его факторов.

Очевидно, что упрощение достигается за счет того, что при этом модель становится нефизичной (небиологичной), так как при этом параметризуется учет влияния всех протекающих процессов, включая законы сохранения. Таким образом, такого типа зависимости представляют собой сугубо эмпирические (не являющиеся даже балансовыми) соотношения. Тип их можно определить как "серый ящик", так как из теоретических соображений известны физические (биологические) предпосылки направленности процессов: факторы (аргументы), определяющие урожайность, мультипликативный и в большинстве случаев заведомо нелинейный характер их влияния (в связи с двусторонним требованием растений к факторам жизни и по недостатку, и по избытку), различные характерные времена их влияния на урожай (температура при заморозках – часы, уровни грунтовых вод – декады и т.п.). С возрастанием степени параметризации используемых в них аргументов: от переменных состояния (концентрации элементов питания, уровни грунтовых вод) к параметрам системы (дозы удобрений, глубины каналов и т.д.) и денежному эквиваленту, зависимости приобретают вид все более "черного ящика". В предельно агрегированном виде модель урожая представляется производственной функцией: Доходы (или Урожай) = $f(\text{Затраты})$.

При любой степени параметризации аргументов эти зависимости получают исключительно путем аппроксимации экспериментальных данных многофакторных (или однофакторных) экспериментов, полученных либо в специальных опытах, либо непосредственно в производственных посевах. Преимуществом эмпирических моделей при использовании для оптимизации является то, что в них автоматически учитывается все многообразие абиотических и биотических факторов, имеющих место на конкретном участке земли.

В литературных источниках имеется масса такого типа регрессионных зависимостей по расчету урожайности в зависимости от различных факторов. К сожалению, эти зависимости (или исходные данные соответствующих полевых экспериментов) плохо применимы, так как зачастую не оговариваются значения остальных, не учитываемых в них, факторов, при которых осуществлялись опыты, диапазонами значений которых фактически и ограничивается обоснованность использования этих эмпирических зависимостей.

Учитывая вышеизложенное, особо остановимся на основных положениях, которые необходимо принимать во внимание при получении таких зависимостей. Прежде всего, надо учитывать, что регрессионные модели заведомо не являются инструментом, раскрывающим действительные физико-биологические процессы формирования урожая от факторов жизни. То есть они не отображают действительный (физико-биологический) вид зависимости урожая от факторов, который даже с учетом оговоренных выше приближений описывается сложнейшей системой нелинейных дифференциальных уравне-

ний, не имеющих решений в квадратурах, а являются лишь формальной аппроксимацией действительных функций произвольно постулируемой алгебраической зависимостью. Их получение имеет смысл только из прагматических потребностей использования в вышеприведенных задачах принятия решений, для которых важно не соответствие физическим процессам, а исключительно точность расчета урожаев, так как при ненадежных зависимостях рассчитываемые параметры мелиоративных систем могут быть совершенно далеки от действительно оптимальных значений.

Аппроксимация эмпирических точек осуществляется функцией произвольно выбираемого типа (что обычно ограничивается уровнем используемого математического аппарата и имеющимися вычислительными возможностями автора экспериментов). В большинстве случаев используется линейная регрессионная зависимость, реже – квадратичная (в общем случае алгебраический полином n -й степени), а также экспоненциальная, показательная и другие типы функций. Аппроксимация, как правило, осуществляется с использованием Евклидовой метрики – по методу наименьших квадратов с оценкой тесноты связи по коэффициенту корреляции (детерминации).

Формальное увеличение коэффициента детерминации может достигаться увеличением степени используемого аппроксимационного полинома (для n эмпирических точек полином степени $n-1$ имеет коэффициент детерминации, равный 1) или увеличением числа аргументов.

Однако высокий коэффициент детерминации в действительности не гарантирует (в особенности на малых выборках) возрастания надежности полученной эмпирической зависимости.

Очевидно, что более соответствующими реальности будут зависимости урожая при учете большего числа влияющих процессов, причем с учетом мультипликативного характера их влияния, включении их в модель не осредненно за вегетацию, а за все более мелкие дискреты времени (фазы развития растений, месяцы, декады).

Однако уже при трех факторах полином второй степени с членами, учитывающими пересечение всех аргументов, требует идентификации 10 коэффициентов, что проблематично из-за обычно имеющегося весьма ограниченного числа экспериментов.

Есть основания ожидать получения более тесной связи при разбиении выборки экспериментов на более однородные кластеры, как по экспериментальным значениям аргументов, так и функции, но одновременно это уменьшает число экспериментов в образуемых кластерах, приходящихся на каждый коэффициент.

Таким образом, использование всех этих приемов лимитируется при получении эмпирических зависимостей количеством имеющихся для идентификации независимых экспериментов (лет наблюдений урожаев). Это связано с тем, что каждый введенный дополнительный аргумент: характеристика процесса или его дискретизация во времени, равно как и принятие аппроксимирующей функции с большим числом членов (показателем сте-

пени), а также предварительная кластеризация эмпирических данных по некоторому аргументу (аргументам) для последующего подбора функций на сгруппированных более однородных наборах данных, увеличивает число подлежащих определению неизвестных коэффициентов. Как правило, это приводит к лучшему сглаживанию (росту коэффициента детерминации), но снижению надежности полученных коэффициентов в связи с малым числом используемых в расчетах имеющихся независимых экспериментов.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что существует бесконечное множество вариантов зависимостей, аппроксимирующих эмпирические данные. Для выбора лучшего варианта необходимы внешние критерии. В частности, для установления оптимальной степени аппроксимационного полинома, оправданности включения дополнительных аргументов могут использоваться критерий Акаике, критерий ВИС и т.п.

Вывод

Получение регрессионных зависимостей урожая на основании экспериментальных данных в значительной степени основывается на эвристических методах. Учитывая также обычно весьма ограниченное имеющееся число экспериментальных данных по урожайности, получение надежных многофакторных зависимостей по расчету урожая, необходимых для моделей оптимизации параметров мелиоративных систем, оптимизации сельхозиспользования, к сожалению, остается одной из главных проблем, затрудняющих получение обоснованных решений. Получение данных, необходимых для повышения точности эмпирических многофакторных зависимостей урожая, может быть обеспечено только на основе ведения автоматизированной книги истории полей в хозяйствах, заполняемой достоверными данными, тем более, что эти зависимости будут соответствовать каждому конкретному полю, что является наиболее надежным при оптимизационных расчетах.

Литература

1. Руководство по проектированию и изысканиям объектов мелиоративного и водохозяйственного строительства в Белорусской ССР (РПИ-82). Ч. II. Осушительные и осушительно-увлажнительные системы. Кн. 1. Осушительные системы самотечные. – Мн., 1985. – 280 с.
2. Вахонин Н.К. Мелиоративное проектирование с позиций системного анализа // Прогнозы водного режима при мелиорации земель. – Мн.: БелНИИМиВХ, 1988. – С. 47-61.
3. Вахонин Н.К. Проблемы оптимального проектирования мелиоративных систем // Мелиорация переувлажненных земель: Тр. БелНИИМиВХ. – Т. 37. Мн., 1989. – С. 39-54.
4. Вахонин Н.К. Системный анализ моделирования природно-технических систем в применении к мелиоративным сельскохозяйственным объектам. // Мелиорация переувлажненных земель: Тр. БелНИИМиЛ, Т. 42. – Мн.: 1995. – С. 45-74.
5. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. – М.: Гостехиздат, 1953. – 292 с.

6. Бихеле З.Н., Молдау Х.А. Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 223 с.
7. Пеннинг де Фриз Ф.В.Г. и др. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 320 с.
8. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 319 с.
9. Стрганова М.А. Математическое моделирование формирования качества урожая. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 151 с.

Summary

Vakhonin N. Principles of Modelling of Reclamation Projects for Reconstruction Designing

It is shown that methods of reclamative systems designing under initial construction, oriented on technical criteria, are inapplicable at reconstructions in condition of the deficit resource. There is offered the methodology of reconstruction designing, basing on optimization on economy-ecological criteria. The methodology is realized by means of multiversion calculation of system parameters on models. There are presented cardinal principles of modeling of processes in all subsystems of reclaimed agricultural object.

Поступила 11 декабря 2006 г.