

## МЕЛИОРАЦИЯ

УДК 631.432:631.559

### КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ В СИСТЕМЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ ВОДНОГО РЕЖИМА

**Н.К. Вахонин**, кандидат технических наук

РУП «Институт мелиорации»  
г. Минск, Беларусь

**Ключевые слова:** модель урожая, система принятия решений, смешанные стратегии, обратная связь, оптимальная траектория, водный режим.

Функциональной целью мелиоративной системы является изменение водного режима, за счет чего должна достигаться хозяйственная цель – урожайность и в конечном итоге цель наиболее высокого –экономического уровня общности[1,2] (рис.1). Принятие решений по регулированию водного режима должно осуществляться решением двух задач: «глобального управления» – выбора оптимальных структуры и параметров мелиоративных систем при проектировании их первоначального строительства и последующих реконструкций и «локального управления» - выбора оптимального алгоритма оперативного регулирования водного режима посредством манипулирования управляющими устройствами (подпорные сооружения, насосы). Очевидна при этом наибольшая предпочтительность одновременного решения обеих задач на стадии проектирования.

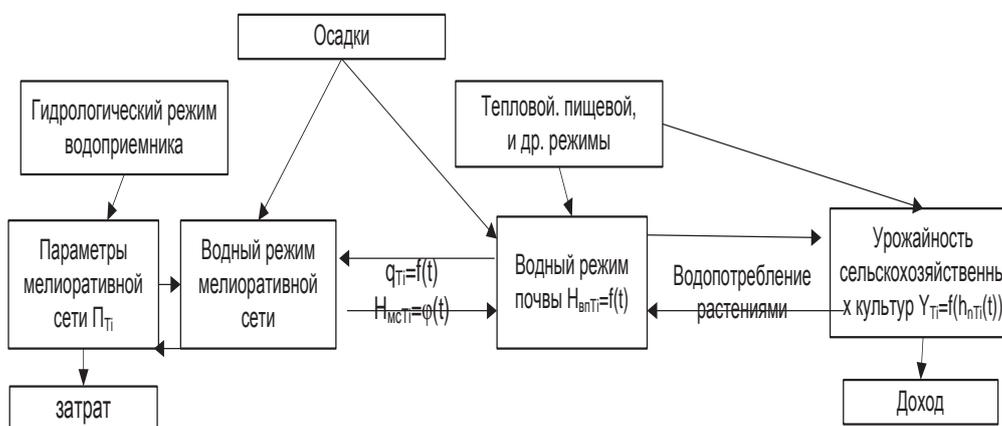


Рисунок 1. Причинно-следственные связи, формирование урожайности сельскохозяйственных культур и экономической эффективности мелиоративных систем.

Благоприятность для произрастания сельскохозяйственных культур, формируемого мелиоративной системой водного режима, определяется цепочкой взаимосвязей в выде-

ленных подсистемах единой системы мелиоративный сельскохозяйственный объект (рис.1): параметры мелиоративной сети – водный режим в мелиоративной сети – водный режим почвы, показатели которых могут использоваться с различным уровнем представительности, в качестве исходной информации при проектировании мелиоративных систем. Необходимость осуществления реконструкции мелиоративных систем, исходя из экономических критериев, по определению являющихся наиболее представительными, определяется снижением доходов (т.е. урожайности выращиваемых сельскохозяйственных культур), в связи с ухудшением водного режима, вызываемым их износом в процессе службы, а также возможным изменением погодно-климатических и соответственно гидрологических условий (при условии оптимальности остальных урожая образующих факторов).

Главным условием принятия обоснованных решений является использование в расчетах надежной модели, связывающей урожайность с состоянием мелиоративной системы, так как точность нахождения урожайности определяет правильность расчета доходов, а, следовательно, экономической эффективности вложения средств в урожайобразующие факторы, в частности в реализацию параметров мелиоративной сети, а также оперативного управления водным режимом. Затратная составляющая в мелиорации (как в случае бизнес планирования и любых других систем) рассчитывается намного проще – в один шаг: выбранный вариант параметров определяет затраты на их реализацию.

Наиболее проблемной составляющей в модели принятия решений является получение многофакторной зависимости урожайности от урожайобразующих факторов, среди которых водный режим почвы является одним из важнейших. Это связано с тем, что в действительности она представляет собой не одно уравнение, а должна включать описание целого ряда физических, химических, биологических процессов как в самих растениях, так и во влияющих на их урожайность подсистемах.

Выбор типа модели урожайности предопределяется с одной стороны видом решаемой задачи, определяющим необходимый уровень точности расчета урожая от определяющих его аргументов (урожайобразующих факторов), а с другой стороны, - возможностью практической ее реализации.

Исходя из первого соображения, для повышения достоверности модели она должна основываться на охвате как можно большего числа факторов, максимальной детальности их рассмотрения и учете связей между ними. Однако возможность практической реализации этого ограничивается возможностью установления вида соответствующих зависимостей и получения необходимого для расчета по ним информационного обеспечения. Компромисс между двумя этими взаимопротиворечивыми требованиями выражается формулировкой, что модель должна быть не изощренной и не упрощенной, а адекватной (т.е. являться искусством возможного).

Наиболее строго реальные физические (биологические) условия в зависимости урожайности от параметров мелиоративной сети, учитываются при включении в модель

всей цепочки зависимостей: водного режима мелиоративной сети от ее параметров – водного режима почвы от водного режима мелиоративной сети – урожайности в зависимости от влажности почвы [1]. Предельная сложность реализации этой задачи связана с рядом обстоятельств: необходимостью установления вида большого числа зависимостей в цепочке от параметров мелиоративной системы к урожайности, сложностью идентификации входящих в них параметров, проблемностью численного расчета, в связи с необходимостью совместного их решения в единой модели.

Входящие в модель урожайности в качестве аргументов характеристики ряда урожая образующих факторов не могут задаваться априорно (в качестве входных воздействий), так как сами являются функцией ряда аргументов, некоторые из которых в свою очередь также зависят от других аргументов причем сложной структуры (представляются вектор-функцией времени, имеют вероятностный характер и т.п.). В частности влажность почвы является функцией осадков, стока, суммарного испарения, которые в свою очередь являются сложными функциями, одним из аргументов которых является сама искомая урожайность (с увеличением урожайности растет величина водопотребления, составляющего основную часть суммарного испарения). Наличие сложных транзитивных цепочек прямых и обратных связей между процессами требует в строгой постановке их расчета в единой системе почва - растение – атмосфера.

К физическим моделям можно отнести те, которые основаны на учете основополагающих физических законов сохранения массы и энергии, т.е. являющихся моделями балансового типа. Среди моделей урожайности это модели, базирующиеся на расчете урожая как суммы приростов биомассы по дискретным промежуткам времени периода вегетации, величина которых в свою очередь рассчитывается на основании баланса поступления и трансформации в растениях химических элементов.

Имеющиеся в настоящее время феноменологические модели урожайности [3-6], основывающиеся на описании физики (биологии) многообразных процессов в растениях неизбежно сложны. Их использование для решения практических задач принятия решений по регулированию факторов жизни растений: водного, а также , пищевого, теплового, и других режимов к сожалению ограничивается возможностью получения для реальных полевых условий информационного обеспечения, необходимого для идентификации нескольких десятков входящих в них коэффициентов.

В связи с этим для решения практических задач, одной из важнейших среди которых в частности является регулирование водного режима с помощью гидромелиорации, неизбежна необходимость использования более упрощенных зависимостей, но имеющих точность достаточную для того, чтобы расчет по ним не становился бессмысленным. Для этого при любых упрощениях, вплоть до предельного – использования нефизических регрессионных зависимостей, должны учитываться базовые общесистемные, общефизические принципы, в том числе установленные при численных экспериментах на строгих моделях.

Сложная структура физических моделей урожайности от водного режима определяется тем, что исходя из законов сохранения, величина урожая формируется суммированием приростов биомассы растений от сева до конечной точки траектории – уборки культуры, зависимость которых от водного режима изменяется на протяжении всего периода вегетации [7,8], наиболее кардинально различаясь по фазам развития растений. При этом особо следует подчеркнуть, что так как растения являются системой с памятью, то прирост биомассы в каждый текущий момент времени, помимо текущей влажности почвы, зависит также от характера ее изменения в течение всего предшествующего периода произрастания, сформировавшего конкретное состояние растения, прежде всего корневую систему, которое определяет необходимое водопотребление соответствующее этому текущему состоянию, т.е. требовательность (отзывчивость растения) к водному режиму. Соответственно оптимальное для растений значение влажности в текущий момент определяется всей последовательностью изменения влажности почвы на протяжении  $T$  предшествовавших временных интервалов с начала сева, определивших текущее развитие растений.

Таким образом, каждому варианту реализации изменения влажности почвы соответствуют свои сформировавшиеся на каждый текущий момент параметры растений, а соответственно требования к водному режиму (оптимальные значения) и урожайность. Очевидно, что при той же реализации влажности почвы, но при других вариантах урожая-образующих факторов (теплового, пищевого, светового и др. режимов) эти параметры и соответственно требования растений к водному режиму, будут другими. Из этого следует, что траектория оптимального для сельскохозяйственной культуры хода влажности почвы на период вегетации не может быть априорно задана, т.к. она зависит как от других факторов, так и от случайного изменения самого водного режима за предшествующий период развития от начала сева до текущего момента (растения являются системой с памятью), которое к тому же имеет стохастический характер.

Так как мелиоративная система инерционна и имеет конечное быстроедействие, а точнее ограниченную скорость (запас) водорегулирующего действия, то обеспечение более оптимального значения влажности в текущий момент может привести к более неблагоприятному сценарию в последующие моменты времени. К примеру, осуществление подачи воды для подъема влажности к оптимальному значению в текущий момент, в случае выпадения больших дождей в следующий период может привести к большому избытку влаги, а соответственно меньшим приростам биомассы, чем это могло бы быть, если бы подача воды в предыдущий период не осуществлялась, в результате чего суммарная биомасса может быть меньше, несмотря на то, что в предыдущем периоде было обеспечено наилучшее развитие растения. С точки зрения водного режима, для последующих периодов очевидную решающую роль играет характер развития корней растений в глубину или в ширину.

Учитывая ограниченность быстрогодействия мелиоративных систем невозможно обеспечение режима влажности почвы оптимального с точки зрения требуемого для получения максимума урожая водопотребления растениями за весь период вегетации. В результате этого оптимальная, с точки зрения возможной регулируемости мелиоративной системой, влажность почвы может принципиально отличаться от биологически оптимально потребной для водопотребления растениями, обеспечение которой может достигаться только идеальной системой – мгновенного быстрогодействия.

При этом более точное регулирование влажности по недостатку, т.е. поддержание ее на более высоком уровне, является более рискованным с точки зрения переувлажнения в случае многоводности будущих периодов, что требует согласованного увеличения быстрогодействия на осушение для исключения потерь урожая.

Так как формирование нерегулируемых входных воздействий – метеофакторов и соответственно влажности имеет стохастический характер, то в каждом году, имеющем конкретную их реализацию, имеет место своя оптимальная кривая изменения влажности почвы, как и любой другой характеристики водного режима (суммарных влагозапасов, УГВ).

При этом наиболее принципиальной проблемой при принятии решений является то, что учитывая случайный характер метеофакторов, т.е. принципиальную невозможность их детерминированного предсказания на предстоящую вегетацию и то, что растение является системой с памятью (требуемая для него оптимальная влажность в каждый текущий момент зависит от ее изменения в течение всего предшествующего периода его развития, в первую очередь, характера развития его корней), оптимальная траектория оптимальной влажности (конкретная матрица перехода) априори неизвестна, так как она определяется каждым конкретным сценарием метеофакторов (не только по водному, но и другим метеорологическим характеристикам, имеющим стохастический характер).

Исходя из вышеизложенного, с точки зрения исследования операций, сельскохозяйственное растениеводство относится к игре человека со слепой природой, в результате чего принятие решений по мелиоративным мероприятиям не может основываться на детерминированных (абсолютных стратегиях), а должно базироваться на принципиально иных – смешанных стратегиях в соответствии с чем принятие решений относится к классу задач стохастической оптимизации (оптимизации в условиях неопределенности (рисков) по входным метеогидрологическим воздействиям). Т.е. изначальный надежный детерминированный график (матрица перехода) хода оптимального водного режима, или «оптимальный диапазон», ограниченный двумя графиками, представлен быть не может и соответственно не может быть использован в качестве стандарта для нахождения отклонений от него реального хода влажности при различных вариантах управления (или его отсутствия) водным режимом для нахождения соответствующих каждому из них величин урожая (или упрощенно потерь урожая от неотрегулированности водного режима).

Характеристикой, отражающей соответствие водно-воздушных условий требова-

ниям сельскохозяйственных растений, т.е. непосредственно влияющей на урожайность, является переменная типа уровня, входящая в описание процесса динамики воды в подсистеме мелиорируемая почва – ее влажность, вместе с характеристикой состояния поверхности почвы – отсутствием или наличием затопления. Наиболее строгим для получения зависимости урожайности является использование влажности почвы в виде распределения ее значений по глубине  $Z$  корнеобитаемой зоны растений по всей осушенной площади -  $W(x,y,z,t)$ . Т.е. наиболее представительной характеристикой водного режима, относительно цели формирования урожайности сельскохозяйственных культур, являются хроноизоплеты влажности почвы (эпюры распределения влажности по глубине корнеобитаемого слоя на каждый последовательный момент времени периода вегетации) в каждой точке осушенного поля.

Сложность получения прогнозов влажности используя строго теоретическое уравнение сохранения массы вызывается двумя принципиальными причинами: сложностью получения надежных феноменологических зависимостей для расчета входящих в него основных расходных составляющих стока и суммарного испарения, которые сами зависят от рассчитываемой влажности почвы на текущий момент времени, для расчета которой они и необходимы, т.е. связаны с ней обратной связью, в результате чего при расчете влажности почвы они не могут задаваться заведомо в качестве входных воздействий, а также вероятностным характером входящих в него погодно-климатических характеристик (осадков, температур).

Сток также зависит от влажности почвы и параметров мелиоративной сети, формирование которых определяется водным режимом (расходами, уровнями) в течение всего предшествующего периода. При этом уровни воды в мелиоративной сети водотоков не могут задаваться изначально, так как в силу неразрывности водной среды они сами зависят от влажности почвы, в результате чего должны рассчитываться.

Последовательная редукция строгой модели достигается исключением в расчетах обратных связей, упрощением и исключением отдельных процессов, переходом от непрерывных пространственно-временных координат к дискретным с соответствующей генерализацией используемых в расчетных зависимостях переменных, что неизбежно сопряжено со снижением их точности.

Упрощение балансовой модели, посредством элиминирования пространственных координат достигается переходом к качественно все более крупным ячейкам, для которых записывается уравнение баланса. При переходе от бесконечно малого объема к дискретному происходит замена модели динамики влажности почвы с распределенными параметрами моделью с сосредоточенными параметрами, что в частности осуществляется при численных расчетах уравнений динамики воды, а также при измерениях при осуществлении точечных наблюдений за процессами в натуральных условиях. С увеличением размера рассматриваемой ячейки теоретическая основа – сохранение баланса остается неиз-

менной, но все более приближенный эмпирический вид приобретают зависимости, описывающие ее приходные и расходные составляющие.

При дальнейшем увеличении размеров дискретизации ячеек до отдельных блоков и подсистем, вплоть до осушаемого поля или мелиоративного объекта в целом, состоящих из разнородной среды, в своей основе модель продолжает базироваться на строго теоретической основе, законе сохранения массы (т.е. остается физической моделью балансового типа), но с использованием по мере укрупнения размеров дискретных блоков, все менее физических зависимостей расчета потоков в уравнении баланса, вплоть до предельно упрощенных эмпирических соотношений, получаемых по принципу «черного ящика».

Снижение при этом точности расчетов является платой за возможность их осуществления (получения зависимостей, расчетные коэффициенты которых могут быть идентифицированы с реально приемлимыми затратами). При этом понятие точность следует относить к расчету не промежуточной характеристики – влажности, а конечной – урожайности.

При получении зависимости урожайности в качестве аргумента, отражающего влияние водного режима, может использоваться его характеристика, относящаяся к любой из подсистем МСХО, в каждой из которых, представляемая изменяющимися во времени переменными двух типов: типа уровня и типа потока. Важнейшим условием обоснованности ожидания получить достоверную зависимость урожая при использовании любой из характеристик водного режима, является учет ее изменения в течение периода вегетации, так как формирование урожайности определяется состоянием водного режима почвы на всем его протяжении от сева до уборки.

При предельно упрощенном подходе – непосредственном использовании в качестве аргумента в зависимости урожайности не влажности почвы, а характеристик водного режима в других подсистемах, получаемые зависимости  $Y=f(H_{mc})$ ;  $Y=f(P_{mc})$ , (где  $H_{mc}$  – уровни воды мелиоративной сети,  $P_{mc}$  – параметры мелиоративной сети, определяющие ее осушительное действие) становятся заведомо не балансовыми все менее физическими, вплоть до зависимости типа «черный ящик». При этом с каждым шагом такого упрощения последовательно уменьшается обоснованность ожидания получить по результатам опытных данных достоверную регрессионную зависимость урожайности от все более опосредованно влияющих на нее аргументов, т.е. снижается их точность.

Являющиеся предельно упрощенным типом зависимостей регрессионные зависимости, представляющие собой формальное сглаживание эмпирических данных произвольно выбираемой функцией, по определению не физичны и поэтому заведомо не могут считаться законом даже при высоких коэффициентах детерминации. Однако, чтобы рассчитываемые по найденной зависимости результаты не противоречили априорным общезначимым (биологическим) соображениям и принципом свойственным процессу формирования урожайности, выбор функций для получения регрессионной зависимости должен отвечать соответствующим условиям:

- При эмпирическом подходе обязательность получения зависимости урожайности в многофакторном виде является важнейшим условием в связи с тем, что действие факторов на урожай имеет не аддитивный, а мультипликативный (с пересечением факторов) характер – влияние любого фактора на его величину может принципиально отличаться при различных уровнях остальных факторов. Пренебрежение этим (т.е. требованием генетической однородности используемых данных) может приводить при обработке эмпирических данных к получению ложной регрессивной зависимости, когда в действительности она отсутствует и наоборот к выводу об отсутствии зависимости урожайности от рассматриваемого аргумента, тогда когда в действительности связь имеется, но может быть установлена только при рассмотрении в составе многофакторной зависимости.

- Так как, как правило, растение накладывает двухсторонние ограничения на наличие каждого фактора (по избытку и недостатку), то заведомо неправомерно использование линейных зависимостей. Заведомо известно также, что отклонение фактора в сторону избытка и недостатка оказывает неодинаковое влияние на снижение урожайности [7,8], в связи с чем используемая функция должна представляться несимметричной кривой. Очевидно, что вышеприведенным требованиям отвечает нелинейная функция, имеющая выпуклый несимметричный вид, к примеру алгебраические полиномы.

- Рассматриваемый аргумент в зависимости урожайности – водный режим может отражаться различными, соответствующими местоположению в цепочке причинно-логическими связями (рис.1) показателями, имеющими различную степень точности (упрощенности), в порядке убывания которой его может представлять:

- водный режим растения, представляемый переменной типа потока – водопотребление растения;
- водный режим почвы, представляемый переменной типа уровня, в качестве которой могут быть выбраны, расположенные в порядке убывания точности показатели:
  - распределение влажности по глубине
  - интегральная сумма влагозапасов корнеобитаемой зоны
  - уровень грунтовых вод в земле и глубина затопления при нахождении воды на поверхности почвы
- водный режим мелиоративной сети, представляемый переменной типа уровня – уровни воды в водотоках.

При этом каждый из возможных вышеприведенных аргументов  $x$  может использоваться в виде:

$$\text{- траектория процесса } x = f(t) \Big|_{t=0}^{t=T_{\text{уборки}}}$$

- статистические характеристики процесса  $x$  (среднее значение, max, min) по фазам развития растений

- предельно агрегированные статистики за весь период вегетации в целом.

Помимо этого каждый из этих показателей может использоваться с различным уровнем агрегированности по пространству:

- среднее значение по элементарным участкам

- с/х полям
- мелиоративному объекту в целом и т.п.

Предельно упрощенным является использование не переменных процессов, а параметров  $P$  мелиоративной системы, включая регулируемые (рукотворные) – геометрические размеры (глубины, ширины, уклоны, расстояния между осушителями и т.п.) и естественные (коэффициенты фильтрации, шероховатости и т.п.) в порядке убывания точности:

- с учетом их изменения во времени в результате старения (или наоборот развития) систем:  $P=f(t)$

- принятие неизменными во времени  $P = P_{\text{проектные}}$

Аналогично по параметрам может использоваться различный уровень их агрегированности по пространству (площадям полей, длине водотоков).

#### Библиографический список

1. Вахонин Н.К. Методологические основы моделирования и создания систем принятия решений в мелиоративном растениеводстве // В кн. Математическое моделирование сельскохозяйственных объектов - основа проектирования технологий и машин XXI века. Материалы Международной научной конференции УП БелНИИМСХ, Минск, 2001, с.61-81.
2. Вахонин Н.К. Методологические принципы формирования задач оптимизации растениеводства. Научно-практ. журнал «Мелиорация переувлажненных земель». № 2 (58), 2007.
3. Бихеле З.Н., Молдау Х.А. Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги // Л.: Гидрометеиздат, 1980, 223с.
4. Ф.В.Г.Пеннинг де Фриз и др. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур // Л., Гидрометеиздат, 1986, 320с.
5. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов // Л., Гидрометиздат, 1988, 319 с.
6. Остроганова М.А. Математическое моделирование формирования качества урожая // Л., Гидрометеиздат, 1986, 150с
7. Афанасик Г.И. Моделирование процесса формирования урожая сельскохозяйственных культур. // В кн. «Мелиорация торфяников и их сельскохозяйственное использование». Вып.3, Мн., 1977, стр. 122 – 127.
8. Закржевский П.И. Модель урожая и динамика факторов внешней среды. В книге «Мелиорация переувлажненных земель». Т. XXV, Мн, 1977.

#### Summary

*N. Vakhonin*

#### CONCEPTUAL BASES OF YIELD MODELING IN THE DECISION- MAKING SYSTEM CONCERNING WATER REGIME REGULATION

The article gives a systematic analysis of the formation of crop yield models as a decision-making basis concerning water regulation in the design of reclamation systems and its management. It is based on the account of the fundamental principles: the availability of complex transitive chains of backward and forward linkages between yield and water and other modes affecting on yield, joint relationship manifestations of stochastic input meteorological influences (and hence water regime) and the fact that the plant is a " memory system ". Consequently it is a priori impossible to develop optimal trajectory of the water regime for plants during the vegetation (humidity, groundwater levels), so the choice of optimal parameters and control algorithm should be carried by the choice of the best alternatives, but not by comparison with the standard.

Поступила 20.10.2014