

деятельности в зоне западно-подступных ильменей: материалы научно-практической конференции – пос. Лиман, 2011. – С. 48-55.

8. *James W., Huber W.C., Dickinson R. E., Pitt R. E., James W. R.C., Roesner L.A., Aldrich J.A.* User's guide to SWMM. – 2003. – xxxiv+700 pp.

## **КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СОГЛАСОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИНТЕРЕСОВ В ДОЛГОСРОЧНОМ ПЛАНИРОВАНИИ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ<sup>5</sup>**

Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л.  
Институт водных проблем РАН, г. Москва  
khran@bk.ru

Регуляторами водопользования являются водохозяйственные системы (ВХС), которые выступают посредниками между природными объектами и водопользователями, согласуя потребности общества в водных ресурсах с возможностью их удовлетворения. Для обеспечения устойчивого развития водоемких отраслей экономики, удовлетворения потребностей населения в воде и экологически приемлемой среды обитания требуется опережающее развитие ВХС. Стратегии развития ВХС, водопользования и водоотведения охватывают достаточно длительный расчетный период и должны обеспечивать устойчивость системы при всех возможных условиях функционирования. Такие стратегии приходится выработать в условиях значительной неопределенности условий и потребностей в воде, а также в характеристиках водных ресурсов. Стратегии формируются в результате компромисса интересов регионов – водопользователей, конкурирующих за воду и за право сброса загрязнений. Согласование интересов осуществляет орган управления ВХС – центр совместно с органами регионального управления водными ресурсами.

Выработка стратегий долгосрочного развития основывается на формировании возможных сценариев (вариантов) развития ВХС и на экспертных оценках эффективности их функционирования в различных прогнозируемых условиях. Также экспертным путем стро-

---

<sup>5</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №14-06-00016).

ются числовые оценки значимости сценариев – субъективные вероятности. Кроме того, различные природные и частично организационно-технические процессы образуют стохастически устойчивые явления, характеризуемые объективными вероятностями. Субъективные и объективные вероятности совместно включаются в комплекс оценок возможных ситуаций функционирования и развития систем в стохастических условиях.

Для преодоления трудностей согласования потребностей водопользования с возможностью их удовлетворения в условиях неустранимой неопределенности структуры, форм и масштабов водопользования предлагается подход, основанный на адаптации к изменениям условий, при которых ВХС может оказаться в отдаленном будущем. Основу подхода составляет развитая в теории управления водными ресурсами методология гарантированного водопользования, оперирующая как текущими поставками водных ресурсов, так и их ориентировочными (так называемыми гарантированными) значениями [1,2]. Подход содержит предпосылки управления, приспособляемого к возможным вариациям условий функционирования ВХС. Он положен в основу методологии четырехэтапной процедуры выработки согласованных стратегий водопользования регионов, обслуживаемых ВХС, представленной комплексом математических моделей, в рамках которого стратегии сравниваются, отбраковываются и выделяются рациональные. Частный случай комплекса моделей, в котором согласуются потребности в объемах водных ресурсов без учета их качества, представлен в [3].

В предлагаемом комплексе моделей структуризация и уровень агрегирования ВХС соответствует цели моделирования – выработке стратегий развития на длительную перспективу. Рассматриваются все сформированные сценарии развития с их вероятностями, при этом допускается корректировка параметров системы. Подробность описания в моделях элементов и процессов в ВХС соответствует степени полноты и точности доступной информации, которая при перспективном планировании не может быть ни абсолютно полной, ни стопроцентно точной. Для наглядности и «прозрачности» представления проблемы рационального использования водных ресурсов и управления их качеством осуществляется максимальное упрощение моделей. Это позволяет в интерактивном режиме общения центра и ЛПР оценивать исходные данные, осмысливать вносимые

упрощения, анализировать получаемые решения и, при необходимости, преобразовывать модели.

В предлагаемых моделях, наряду с переменными, изображающими реальные водные ресурсы, присутствуют переменные, соответствующие их ориентировочным значениям. Модели описываются двухэтапными задачами стохастического программирования. Стратегические переменные первого этапа, выбираемые при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, моделируют ориентировочные значения объемов водных ресурсов и масс примесей. Tактические переменные второго этапа, выбираемые при конкретных реализациях стохастических условий, множество которых предполагается конечным, соответствуют реальным объемам водных ресурсов и массам примесей. Целевые функции этих задач оценивают эффективность использования водных ресурсов и управления их качеством. В результате решений, получаемых в моделях, определяются оптимальные стратегии и их тактические вариации при различных реализациях стохастических условий. В решениях задач, которыми описываются модели, неявным образом содержатся оптимальные значения надежности гарантированного водопользования. Кроме того, побочным эффектом присутствия в модели переменных, соответствующих текущим поставкам и их ориентировочным величинам, являются оптимальные оценки рисков снижения эффективности водопользования из-за неполного (по сравнению с ориентиром) поступления водных ресурсов и/или худшего качества, а также шансов повышения оценки при получении дополнительного количества водных ресурсов и/или лучшего качества.

Рассматриваются две разновидности структуризации бассейнов: веерная и сетевая. При веерной структуризации все водные ресурсы бассейна сосредоточены в одной вершине, из которой регионы-водопользователи получают по мере возможности необходимую им воду. В сетевой структуризации ВХС изображается сетью, потоки которой моделируют объемы воды и массы примесей. Водопользователи изображаются вершинами, в которые поступают водные ресурсы и из которых отводятся стоки.

Вначале, на первом этапе, рассматриваемая ВХС структурируется в виде веерной схемы, каждый луч которой соответствует региону, и формируется статическая модель распределения водных ресурсов без учета их качества. Все располагаемые водные ресурсы

собираются в совокупный ресурс за весь расчетный период и помещаются в вершину, изображающую источник, мощность которого соответствует совокупному ресурсу. В каждом регионе формируется свой совокупный спрос на водные ресурсы. Регионы оценивают эффективность использования водных ресурсов в виде функций, зависящих как от реальных объемов воды в различных стохастических условиях, так и от их гарантированных значений. Модель описывается задачей  $A$  максимизации математического ожидания суммарной эффективности использования регионами водных ресурсов ВХС на множестве, выделяемом ограничениями на объемы используемой воды и требованиями регионов к минимальным значениям поставляемых им водных ресурсов.

Решение этой двухэтапной задачи стохастического программирования не вызывает затруднений. Например, для ее решения может быть применен метод динамического программирования [4]. Однако для поиска оптимальных векторов задачи  $A$  и всех рассматриваемых ниже задач естественно воспользоваться методом групповой координатной оптимизации, в котором последовательно отыскивается оптимум по группам системных и индивидуальных переменных [5, 6]. В рассматриваемой проблеме системными переменными, которыми распоряжается ВХС, являются реальные объемы водных ресурсов. В качестве индивидуальных переменных выступают гарантированные значения объемов водных ресурсов, которые принадлежат регионам. Решение начинается с задания произвольных значений гарантированного водопользования регионов, как правило, их предлагают ЛПР. При фиксированных значениях гарантированного водопользования задача распадается на независимые решаемые центром задачи распределения водных ресурсов, каждая из которых соответствует конкретной реализации стохастических условий. Найденное на втором шаге распределение водных ресурсов используется для нахождения новых значений гарантированного водопользования, которые на последующих шагах применяются для получения следующего приближения распределения водных ресурсов и т. д. Метод групповой координатной оптимизации привлекателен тем, что в выработке решений взаимодействуют ВХС и регионы, и это дает возможность наблюдать и оценивать последовательные приближения к оптимальному решению и переосмысливать проблему.

Поиск компромисса на первом этапе показывает, существует ли хотя бы гипотетическая возможность удовлетворить запросы регионов. Если при решении задачи обнаруживается отсутствие допустимого решения, то необходимо пересмотреть экзогенные параметры модели, в частности, требования регионов. Если допустимые векторы задачи существуют, то ЛПР регионов проводят анализ полученного решения, в котором наряду с оптимальными величинами водопользования и их ориентировочными значениями присутствуют надежность гарантированного водопользования, стоимостные оценки водных ресурсов, величины рисков и шансов. При положительной оценке достигнутого результата осуществляется переход ко второму этапу, на котором рассматривается статическая сетевая модель. В противном случае модель первого этапа пересматривается.

В статической сетевой модели, рассматриваемой на втором этапе, конфигурация поступления и использования водных ресурсов представлена более подробно, чем на первом этапе; определяются не только количественные, но и их качественные показатели. ВХС структурируется в виде сети, конфигурация которой воспроизводит конфигурацию движения воды и примесей в системе. Потoki в сети моделируют объемы воды и массы примесей. Потoki, соответствующие реальным объемам и массам, образуют группу системных переменных; потоки, изображающие их ориентировочные величины, являются индивидуальными переменными. Модель описывается задачей **B** максимизации математического ожидания суммарной эффективности использования регионами водных ресурсов и управления их качеством. Допустимое множество задачи выделяется уравнениями, описывающими баланс масс воды и примесей в вершинах и законы преобразования потоков в дугах сети, а также неравенствами, включающими требования, предъявляемые к количеству и качеству водных ресурсов и их ориентировочным величинам.

Задача **B**, которой моделируется совместное управление количеством и качеством водных ресурсов, – многоэкстремальная [3]. Ее целевая бисепарабельная функция, вообще говоря, невогнутая. В ограничениях, налагаемых на переменные, присутствуют билинейные уравнения, порождающие невыпуклость допустимого множества. Общих методов решения многоэкстремальных задач нет. Однако указанная особенность задачи **B** позволяет построить метод ее решения. Процедура решения представляет собой детализацию

схемы ветвей и границ, в которой решение исходной задачи с погрешностью, не превосходящей заданную, сводится к решению конечной последовательности оценочных задач выпуклого программирования [7]. В формировании оценок промежуточных решений задачи  $B$ , используемых в методе ветвей и границ, включаются имеющие самостоятельное значение подзадачи выпуклого программирования, описывающие рациональное использование водных ресурсов без учета их качества (задача  $B_1$ ) и управление качеством водных ресурсов при фиксированных их объемах (задача  $B_2$ ). Включение подзадач  $B_1$  и  $B_2$  в процедуру решения задачи  $B$  образует сходящийся итерационный процесс, дающий возможность оценивать взаимодействие количественных и качественных особенностей водных ресурсов. Отделимость ограничений, формирующих допустимые множества задач  $B$ ,  $B_1$  и  $B_2$ , делают возможным использовать метод групповой координатной оптимизации для оценивания последовательных приближений к оптимальному решению.

Сетевая модель второго этапа, так же как веерная модель первого этапа, оценивает возможность удовлетворения запросов регионов. При этом более подробно учитываются возможности поставок водных ресурсов из различных частей ВХС и их качество. При анализе решений, получаемых в модели  $B$ , так же, как в модели  $A$ , участвуют значения надежности гарантированного водопользования, рисков, шансов и стоимостных оценок показателей водных ресурсов. При отсутствии допустимого вектора задачи  $B$  она пересматривается. Если в задаче не удается достичь положительного результата, то осуществляется возврат на первый этап и задача корректируется. При положительной оценке результата следует переход к третьему этапу, представленному сетевой динамической задачей для более полной оценки рационального использования водных ресурсов и управления их качеством не только в пространстве, но и во времени.

Рассматриваемая на третьем этапе модель согласования интересов регионального водопользования отличается от модели второго этапа переходом от статики к описанию процессов использования водных ресурсов и управления их качеством в дискретном времени. Задача  $C$ , описывающая модель, и ее подзадачи  $C_1$  и  $C_2$  аналогичны рассматриваемым на втором этапе задачам  $B$ ,  $B_1$  и  $B_2$ . Задачи  $C$ ,  $C_1$  и  $C_2$  преобразуются в эквивалентные задачи  $B$ ,  $B_1$  и  $B_2$  на расширенной сети, формируемой на базе исходной дублированием ее

столько раз, на сколько интервалов времени разбит весь расчетный период. Решение этих задач, отличающихся от задач  $B$ ,  $B_1$  и  $B_2$  второго этапа только большей размерностью, осуществляется так же, как на втором этапе. При получении в этой задаче приемлемого результата осуществляется переход к еще более детальной имитационной модели четвертого этапа, в противном случае – возврат на второй этап.

Учет особенностей водопользования и водоотведения, отсутствующих в оптимизационных моделях, отражается в имитационной модели  $D$  на четвертом этапе. В ней со значительно большей подробностью представлены параметры и процессы, неучтенные в моделях оптимизации, рассматриваемые на предыдущих этапах. Отсутствие в модели  $D$  целевой функции дает возможность структурировать ВХС в виде сети, более подробно отражающей взаимосвязи элементов, чем в моделях первых трех этапов. При этом также можно более подробно представить динамические особенности использования водных ресурсов и множество реализаций стохастических условий. Если в результате серии имитационных экспериментов с использованием модели  $D$  удастся найти приемлемое решение, то процесс выработки стратегии согласования интересов регионального водопользования можно полагать завершенным. В противном случае осуществляется возврат к модели третьего этапа, которая трансформируется в соответствии с невязками, выявленными на четвертом этапе.

Описанную выше взаимосвязь четырех этапов выработки стратегии согласования интересов регионального водопользования иллюстрирует рис. 1, где блоки соответствуют: (1) – всеобщей статической, (2) – сетевой статической, (3) – сетевой динамической и (4) – имитационной моделям.

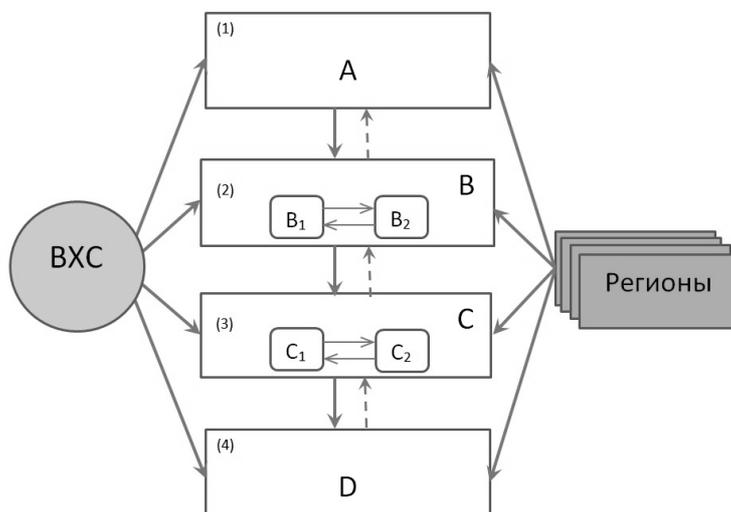


Рис.1 – Взаимосвязь моделей согласования регионального водопользования

#### Литература

1. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока на основе теории вероятностей// Труды ВИСУ. Гидротехнический сборник. 1932. №4. С.7–31.
2. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Производственные функции в условиях неопределенности // Экономика и математические методы. 2007. Т. 43. №1. С.16–26.
3. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. – М.: Научный мир, 2010. 230 с.
4. Беллман Р. Динамическое программирование.– М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. 400 с.
5. Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б. Методы расчета и синтеза импульсных автоматизированных систем// Автоматика и телемеханика. 1963. №12, С. 1643–1659.
6. Райков Л.Д. Вопросы построения и применения АВМ для многовариантных задач// Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: МИЭМ, 1966. 239 с.
7. Лазебник А.И., Хранович И.Л., Цаллагова О.Н. Обобщенные сепарабельные задачи и их приложения // Автоматика и телемеханика. 1981. №8. С.107–118.