
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ,
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ

УДК 556.18:626

**ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДОЛГОСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
ДЛЯ МАЛОМАСШТАБНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

© 2011 г. Д. М. Ярошевский

Институт водных проблем Российской академии наук

119333 Москва, ул. Губкина, 3

Поступила в редакцию 09.02.2010 г.

Предложена общая структура системы математических моделей для решения проблем водообеспечения, охраны вод и защиты от паводхий и паводков применительно к маломасштабным водным объектам. Рассмотрены различные аспекты этих объектов, выделяющие их среди других водных объектов.

Ключевые слова: маломасштабные водные объекты, математические модели, классификация, комплексное использование и охрана вод, системный анализ.

В настоящей статье речь идет о маломасштабных водных объектах, расположенных в равнинных бассейнах. Возрастание уровня использования и общего антропогенного воздействия на водные объекты приводит к усложнению структуры водохозяйственных систем (ВХС), участники которых предъявляют часто противоречивые требования к регулированию, использованию и охране вод, а также к защите от паводков. В полной мере это относится и к маломасштабным водным объектам. В результате практически все водные объекты продолжают оставаться в федеральной собственности, что не позволяет уделять должное внимание, прежде всего, маломасштабным водным объектам, причем деградация (и полное исчезновение) малых рек идет с нарастающей скоростью, даже в центральном регионе Европейской территории России. Это особенно ярко проявилось во время экстремальных погодных условий летом 2010 г.

Традиционная классификация водных объектов по крупности, как правило, ранее проводилась по какому-либо одному критерию, что приводило не только к неопределенности, но и к ярко выраженной неоднозначности. Так, например, наиболее распространены были классификации по общей площади водосбора, по длине реки, по среднегодовому стоку и даже по гарантированным судоходным глубинам в руслах [5]. Автор идет по пути иной группировки водных объектов, их масштабности. Помимо перечисленных критериев предлагается добавить, прежде всего, значимость водного объекта по технико-экономическим соображениям, класс капитальности гидроузлов, время добегания потоков воды и загрязнений по руслу и пойме и другие. Но главной целью выявления отличий одного типа водных объектов от других будет возможность най-

ти упрощающие предпосылки, позволяющие применить простые математические модели для принятия долгосрочных приемлемых стратегических решений эколо-экономического планирования мероприятий.

Перейдем теперь к детальному рассмотрению специфики маломасштабных водных объектов. С точки зрения выбора упрощенных методик расчета главный вопрос – выбор расчетных интервалов времени, позволяющих внутри них провести необходимые осреднения характеристик по ВХС в целом. При этом надо отметить недостаточную гидрологическую изученность, отсутствие надежных прогнозов стока, затрудненность пространственной экстраполяции гидрологических характеристик, а также возможность аппроксимации расчетных гидрографов паводхий и паводков аналитическими зависимостями. Гидравлические особенности сводятся к возможности пренебречь временем добегания потоков воды между соседними частями ВХС. Как правило, гидравлические уклоны здесь выше, чем на средних и крупных объектах. С хозяйственно-отраслевой точки зрения следует указать на примерную синфазность колебаний водопотребности на различных частях использования стока, незначительную долю участников использования стока с высокой (95% и более) обеспеченностью водоотдачи. В экологическом плане для маломасштабных водных объектов типична высокая чувствительность к антропогенным воздействиям, повышенные требования к комплексным попускам из прудов и водохранилищ. В климатическом плане характерна пространственная однородность соответствующих факторов, обуславливающих потребности в воде, а также наличие более “тесной”, чем в крупных бассейнах, корреляции между климатиче-

скими факторами и колебаниями гидрологических характеристик. С точки зрения экономической можно отметить возможности пренебречь неодновременностью капитальных затрат на проведение мероприятий в разных частях ВХС, построение укрупненных стоимостных зависимостей гидроузлов и параметров очистных сооружений, а также оценку ущербов от прохождения паводков и половодий и примерную пропорциональность эксплуатационных и капитальных затрат по гидроузлам. Наконец, с гидрогеологических позиций можно отметить то, что в силу малой глубины дренирования малыми реками подземных горизонтов, этими процессами дренирования также часто удается пренебречь. Рассмотрение особо дефицитных по воде территорий (например, засушливые регионы богарного земледелия) не меняет состав предлагаемой далее системы математических моделей, поскольку такие объекты становятся как бы дополнительными безвозвратными потребителями воды.

Особое место занимают организационный и правовой аспекты в отношении маломасштабных водных объектов. Эти аспекты взаимосвязаны, притом они особо актуальны для условий России. Последнее обстоятельство обусловлено несколькими причинами. В организационном плане это связано с очень большой территорией страны и, как следствие, с огромным числом маломасштабных водных объектов, счет которых идет на миллионы. В отличие от развитых стран Западной Европы здесь сталкиваемся не только со значимостью проблем, но и с традиционно низкой экологической культурой населения, не вполне удовлетворительным уровнем образования собственно экологов, особенно работников, отвечающих за эксплуатацию объектов. В правовом плане наиболее остро стоит давний вопрос о разграничении прав на собственность в отношении водных объектов между федеральными органами, субъектами Федерации и муниципальными образованиями. Некоторые подвижки в этом направлении наметились в новой редакции Водного кодекса Российской Федерации [1]. Однако и здесь большинство положений имеют декларативный характер, откуда непонятны принципы, по которым те или иные водные объекты могут быть отнесены к конкретному типу собственности.

Перейдем к краткому структурному описанию системы математических моделей. Эти модели в отношении маломасштабных водных объектов можно, прежде всего, разделить по трем основным проблемным направлениям

обеспечение потребностей водопользователей в необходимом количестве водных ресурсов;

мероприятия по сохранению качества вод, борьба с деградацией водных объектов, решение комплекса водно-экологических проблем;

защита объектов от вредного воздействия вод, в первую очередь – от половодий и паводков.

Иной тип классификации математических моделей возникает при рассмотрении применяемых видов моделей. На первый взгляд, все здесь достаточно просто.

На верхнем уровне применяются динамические стохастические модели оптимизации по всем трем проблемным направлениям. Эти модели, исходя из информационных и вычислительных соображений, строятся по предельно упрощенной схеме, ориентируясь на минимально допустимое число рассматриваемых стохастических исходов и достаточно крупные интервалы времени.

На среднем уровне вносится ряд предпосылок в “физику” анализируемых процессов, что позволит рассмотреть водные объекты в деталях, которые не удастся исследовать на моделях верхнего уровня.

Наконец, нижний уровень ориентирован на модели имитационного типа, с помощью которых в отсутствие критерия оптимизации можно при многократных имитационных экспериментах находить рациональные решения, близкие тем, которые показали модели оптимизации первых двух уровней.

На самом деле ситуация оказывается существенно сложнее. Это требует ряда дополнительных пояснений.

Во-первых, собственно планируемые мероприятия относятся к разнородным техническим объектам и технико-природным явлениям. Например, водохранилища (пруды) и соответствующие гидроузлы в своей взаимосвязи, как правило (но не всегда), выполняют функции по всем трем упомянутым проблемным направлениям. При этом они, будучи одними из основных элементов управления, содержат в себе большое число разнообразных характеристик

полезные, полные и мертвые объемы водохранилищ;

режимы их работы в различных временных разрезах;

параметры плотин;

типы сбросных сооружений и их сопряжения;

процессы фильтрации через тела плотин или в обход их;

мероприятия по укреплению берегов и строительство дамб обвалования.

Отдельно рассматриваются системы водозабора и подачи воды (насосные станции, каналы, магистральные трубопроводы), собственно водопользователи с их потребностями и экономическими показателями обеспечения водой, очистные сооружения с указанием классов загрязняющих веществ и достижимой ими степени очистки вод при выборе схем и методов снижения уровней загрязнения. Особую роль играют экологические мероприятия – борьба с зарастанием водоемов и русел рек различными видами водорослей, обеспечение санитарных и экологических попусков, расширение зон охраны

вод, широкий спектр мер, способствующих отдыху людей вблизи водоемов, непромышленное рыболовство, противоэрозионные меры, в том числе образование оврагов и прочее [5]. Гидробиологический аспект образует отдельное направление исследований. Из недавних публикаций, где, в том числе, широко представлен указанный комплекс вопросов, можно отметить статью [2].

Во-вторых, исследуемые проблемы и процессы имеют разный временной разрез. Так, например, если выбор стратегических мероприятий в плане обеспечения потребностей водопользователей и/или охраны вод ориентирован на многие годы (десятилетия), то анализ процессов, обусловленных прохождением половодий и особенно – дождевых паводков, требует в отношении маломасштабных водных объектов перехода к декадным, суточным, а иногда и к часовым интервалам времени. Этим объясняется различный характер стохастического описания задач рассматриваемого комплекса.

В-третьих, традиционно многие процессы принципиально остаются не учитываемыми, главным образом, по информационным соображениям. Здесь достаточно привести один пример. В середине 1970-х гг. в разных странах при анализе дождевых паводков осуществлялись попытки принимать во внимание движение ливневых вод в пределах водосборных площадей. Эти проблемы обсуждались на международном симпозиуме в Ленинграде в 1977 г. [8]. Несколько позднее все эти исследования были во многом “свернуты” вследствие невозможности создать их информационное обеспечение.

Заметим, что многие частные проблемы все еще содержат не вполне разработанные методологические вопросы. Подходы к их решению в некоторой мере изложены в работах [6,7]. Наконец, можно отметить давно ставшую традиционной в системном анализе проблему структуризации систем разнородных математических моделей. Вкратце суть этой проблемы можно свести к следующему. Разработчики подобных систем иногда оказываются перед дилеммой: либо попытаться весь спектр задач выразить в форме единой целостной модели, либо разбить систему на большое число частных задач. Оба таких крайних подхода обычно не приводят к положительному результату. Попытки создать целостную модель иногда могут дать возможность записать ее на бумаге, однако чаще такая модель не может быть реализована из-за вычислительных трудностей. Напротив, когда число частных задач в системе очень велико, возникают непреодолимые трудности в организации их взаимодействия. Поэтому на начальных этапах искусство моделирования во многом сводится к поиску “золотой середины”, отвечая на вопросы, какие именно задачи можно объединить в одну модель и как осуществить взаимодействие между такими подсистемами моделей.

Рассмотрим первичные соображения о структурировании системы моделей применительно к проблеме, изложенной в настоящей работе. Уже на верхнем уровне моделирования (динамические стохастические модели) возникают некоторые неясности в структурировании. Один момент представляется достаточно очевидным: соответствующий класс задач, относящихся к защите от половодий и паводков, не удается соединить в единый комплекс с задачами водообеспечения и выбора мероприятий по охране вод. Менее очевидна принципиальная реализуемость в рамках единой математической модели задач по обеспечению потребностей в воде водопользователей и по качеству воды. С одной стороны, в работе [4] предложен математический аппарат, пригодный для решения обеих задач в виде целостной модели. С другой стороны, в указанной статье отсутствует профилирование вычислительной схемы алгоритма, – тем более, применительно к рассматриваемой проблеме. Поэтому вопрос об объединении обеих задач в единую модель все еще остается открытым и требует дальнейших исследований.

Примерно аналогичная картина наблюдается и в отношении задач второго уровня. Здесь имеется целый ряд наработок, позволяющих говорить об относительно несложном соединении в единый модельный комплекс задач по обеспечению потребностей водопользователей и выбору мер по охране вод. Что касается модели второго уровня выбора противопаводковых мероприятий, она сама по себе представляет модельный комплекс. На первом этапе решается задача определения параметров гидрографов паводков (половодий), которые наиболее опасны, но еще не приводят к катастрофическим последствиям. На втором этапе в детерминированной форме проводится собственно оптимальный выбор параметров гидросооружений [9].

Еще более сложная картина наблюдается в отношении моделей третьего уровня (имитационных). Прежде всего, сделаем предположение, что по каждому из трех проблемных направлений может потребоваться собственная имитационная модель. Перечислим основные причины сложностей, возникающих при создании моделей третьего уровня.

Во-первых, для каждого типа имитационных моделей требуется провести достаточно объемную серию имитационных экспериментов, поскольку в моделях этого класса отсутствует критерий оптимизации, следовательно, поиск приемлемых детальных решений неизбежно подразумевает применение методологии “проб и ошибок”. При этом ключевой становится проблема ускорения сходимости процедуры выработки приемлемых решений на основе серии имитационных экспериментов. Если решения, получаемые с помощью таких серий экспериментов, дают значительную невязку с решениями, получаемыми на втором или первом уровне, то потребуются возврат к решению задач верхних уров-

ней с необходимой коррекцией их экзогенных параметров [3].

Во-вторых, часть зависимостей между параметрами имитационной модели принципиально нельзя описать в аналитическом виде. Они выражаются только в алгоритмической форме. При этом характер и даже сам факт работы отдельных частей такого алгоритма зависит от широкого набора условий (точнее, от сочетания этих условий), принимающих конкретные значения по ходу вычислений. Наличие в имитационных моделях целого ряда не формализуемых и плохо формализуемых соображений со стороны лиц, принимающих решения, и сама специфика поэтапного процесса многостороннего анализа и детализации этих решений подразумевают вмешательство лиц, принимающих решения, в процедуру компьютерных вычислений. Следствием этого становится необходимость программных прерываний по ходу моделирования, что подразумевает наличие развитой диалоговой оболочки в самих имитационных моделях.

В-третьих, процедура имитации немыслима без статистического моделирования случайных характеристик различных природных процессов. Объем и вычислительная трудоемкость статистического моделирования и самой имитационной модели определяется, прежде всего, суммарной продолжительностью периода имитации (длиной моделируемого ряда), детальностью отдельных интервалов времени и сложностью возникающих функций распределения. Отсюда напрашивается вывод о том, что имитация прохождения и трансформации паводков и половодий не может быть описана в форме целостной модели с иными типами имитационных моделей (в силу существенно более коротких интервалов времени). Кроме того, следует учитывать, что функции распределения вероятностей для половодий и паводков могут оказаться различными. Что касается имитационных моделей по проблемам водообеспечения и качества (охраны) вод, здесь теоретически возможно создание единого модельного комплекса. Однако подобная попытка применима далеко не ко всем маломасштабным объектам, что обусловлено, прежде всего, информационно-технологическими соображениями.

Это требует более подробного пояснения. На территории Российской Федерации имеется относительно небольшое число маломасштабных водных объектов, относительно которых достаточно развита сеть наблюдений за речным стоком и за качеством водных ресурсов. К таким объектам можно отнести только некоторые из тех, которые находятся на территории Центрального и Южного округов России. Для таких примеров создание и применение упомянутого модельного комплекса представляется допустимым, хотя и требует дополнительного анализа возникающих трудностей реализации вычислительных алгоритмов. Как бы на другом

“полосе” на значительной территории России располагаются маломасштабные объекты, по которым практически многие десятилетия (возможно, никогда) не проводились репрезентативные наблюдения. Здесь также возможно создание модельного комплекса из имитационных моделей водообеспечения и охраны вод, поскольку возникающая погрешность при таком моделировании, очевидно, не превзойдет погрешности в имеющейся исходной информации. Что касается остальных маломасштабных объектов, которые составляют подавляющее большинство, то объединение их моделей в целостный комплекс представляется сомнительным.

ВЫВОДЫ

Маломасштабные водные объекты обладают спецификой, относящейся к различным аспектам стратегического моделирования (понятийным, экономическим, экологическим, организационно-политическим, информационно-технологическим и многим другим). Реализация инвариантно применимой системы математических моделей для таких объектов – это многолетний процесс, требующий не только значительных материальных средств, но и привлечения специалистов различного профиля. Эффект от вложений в реализацию моделей выражается как в экологической составляющей, так и в экономических показателях. Пренебрежение к проблемам маломасштабных объектов уже давно ведет к их глубокой деградации, а часто и к полному уничтожению.

Всю область практического применения моделей можно условно разделить на две группы. В первую группу входят так называемые объекты прямого применения. Здесь большинство предпосылок выполняется с достаточной точностью, а имеющиеся локальные особенности либо учитываются заранее заложенными в компьютерную реализацию ограничениями, либо требуют их специальной интерпретации, но без изменения программного комплекса. При этом модифицируются только способы анализа исходной и результирующей информации. Во вторую группу входят объекты, где в силу местных условий не всегда выполняются предпосылки. Эти объекты можно назвать объектами косвенного применения моделей.

Некоторые реализованные модели применялись авторами на многих реальных объектах, отличавшихся своим масштабом, сложностью водохозяйственной системы и разнообразием характеристик водопользования. К объектам прямого применения можно, например, отнести: проект регулирования стока малых рек – притоков рек Сож и Западной Двины, технорабочий проект регулирования стока р. Урала выше Ириклинского водохранилища, технико-экономическое обоснование оросительной-осушительной системы в бассейне р. Большая Курица и другие.

К объектам косвенного применения можно отнести бассейны рек Оми, Уды, Чулыма (разрабатывались схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов), а также рек в трех районах Якутии (выполнялось технико-экономическое обоснование водоснабжения) и некоторые другие. Объекты косвенного применения в большей мере иллюстрируют возможности использованной системы математических моделей при вариации исходных данных в соответствии с разными принципами управления маломасштабными водохозяйственными системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водный кодекс Российской Федерации. М.: Проспект, 2008. 48 с.
2. Данилов-Данильян В.И., Болгов М.В., Дубинина В.С. и др. Оценка допустимых изъятий стока в бассейнах малых рек. Методические положения // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 224–238.
3. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л., Ярошевский Д.М. Математические модели стратегий рационального водопользования в условиях неопределенности // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 4. С. 500–509.
4. Лазебник А.И., Хранович И.Л., Цаллагова О.Н. Обобщенные сепарабельные задачи и их приложения // Автоматика и телемеханика. 1981. № 8. С. 107–118.
5. Малые реки России (использование, регулирование, охрана, методы водохозяйственных расчетов). Свердловск: Средне-Уральское кн. изд-во, 1988. 320 с.
6. Обоснование стратегий управления водными ресурсами / Под ред. Данилова-Данильяна В.И. М.: Науч. мир, 2006. 336 с.
7. Пряжинская В.Г., Ярошевский Д.М., Левит-Гуревич Л.К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2002. 496 с.
8. Специфические аспекты гидрологических расчетов для водохозяйственного проектирования. Матер. междунар. симпоз. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 822 с.
9. Yaroshevskii D.M. Selection of the Form of Calculated Flood Hydrograph in Designed Water Release Facilities // Destructive Water, Congress'96. USA. Anaheim: IAHS-Press, 1996. Paper № D-21. P. 41–50.

Сдано в набор 15.11.2010 г.	Подписано к печати 04.02.2011 г.	Формат бумаги 60 × 88 ¹ / ₈
Цифровая печать	Усл. печ. л. 16.0	Уч.-изд. л. 16.4
	Усл. кр.-отт. 3.3 тыс.	Бум. л. 8.0
	Тираж 197 экз.	Зак. 1095

Учредители: Российская академия наук,
Институт водных проблем РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”
Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6