

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

**В.И. Данилов-Данильян, И.Л. Хранович**

**УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ.  
СОГЛАСОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ  
ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ**

Москва  
НАУЧНЫЙ МИР  
2010

**УДК 556.18: 626/628**  
**ББК 26.222**

**Д17 Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л.**

**Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования.** - М.: Научный мир, 2010. - 232 с.

**ISBN 978-5-91522-202-0**

Рассмотрены экологический, экономический, социальный и политический аспекты нарастающего глобального водного кризиса и возможности России в решении проблем дефицита водных ресурсов. Проведен анализ особенностей управления водными ресурсами внутри страны и на международном уровне. Развита методология и предложены процедуры согласования стратегий водопользования в условиях неопределённости и соответствующие комплексы математических моделей, в которых, наряду с объемами водных ресурсов, реально получаемых водопользователями, присутствуют ориентировочные значения этих объемов, играющие роль виртуальных ресурсов («гарантированные» объемы). Представлено согласование стратегий водопользования в иерархических структурах и в системах, использующих трансграничные водные объекты. Приведено обоснование долгосрочных стратегий водопользования и планирования водоохраных мероприятий, а также стратегий управления совместным использованием поверхностных и подземных вод. Разработаны подходы к формированию рынков водопользования и водоотведения. Исследованы методологические основы формирования природной ренты и устойчивости функционирования водохозяйственных систем.

Для специалистов по экономике природопользования и управлению водными ресурсами, аспирантов и студентов соответствующего профиля.

**Danilov-Danilyan V. I., Khranovich I. L.**

**Water resources management. Harmonizing water use strategies.** - М.: NAUCHNYI MIR, 2010.-232 p.

The environmental, economic, social, and political aspects of the progressive global water crisis and the potentialities of Russia in solving the problems of water resources deficiency are discussed. The specific features of water resources management within the country and at the international level are analyzed. The methodology is developed and procedures are proposed for harmonizing water use strategies under uncertainty; they are supplemented by appropriate complexes of mathematical models, which, in addition to the volumes of water resources actually consumed by water users, involve the tentative values of such volumes, playing the role of virtual resources («guaranteed» volumes). The harmonization of water use strategies in hierarchical structures and in systems using transboundary water bodies is presented. Long-term strategies for water use and planning water protection measures, as well as control strategies for joint use of surface and subsurface waters are substantiated. Approaches are developed for the formation of water use and water disposal markets. The methodological principles for the formation of natural resource rent and the functioning stability of water management systems are studied.

The book is intended for experts in the environmental economics and water resources management and for postgraduates and students in appropriate fields.

**ISBN 978-5-91522-202-0**

Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л., 2010  
Оформление, Научный мир, 2010

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	11
Глава 1	
ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ МИРА .....	18
1.1. Вода в жизни человечества .....	18
1.2. Запасы воды на Земле .....	21
1.3. Загрязнение воды и его последствия .....	24
1.4. Последствия нерационального водопользования .....	29
1.5. Экстенсивное и интенсивное водопользование .....	33
1.6. Водоёмкость производства и эффективность водопользования .....	40
1.7. Дефицит пресной воды - глобальная проблема .....	44
1.8. Политические последствия дефицита пресной воды .....	49
1.9. Заключение .....	50
Глава 2	
ВОДА - СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ РОССИИ .....	52
2.1. Водные ресурсы России .....	52
2.2. Первоочередные задачи .....	61
2.3. Долгосрочные задачи .....	65
2.4. Заключение .....	71
Глава 3	
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ .....	74
3.1. Подход к согласованию стратегий использования водных ресурсов .....	74
3.2. Гарантированное водопользование - виртуальный ресурс .....	76
3.3. Оценки эффективности использования водных ресурсов .....	78
3.4. Риск, шанс и надежность .....	81
3.5. Математическая модель оптимального использования ресурсов .....	82
3.6. Оценка эффективности режимов орошения .....	85
3.7. Влияние страхования рисков водопользования на управление ВХС .....	94
3.8. Заключение .....	99
Глава 4	
ОБОСНОВАНИЕ ДОЛГОСРОЧНЫХ СТРАТЕГИЙ РАЦИОНАЛЬНОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ .....	100
4.1. Введение .....	100

4.2. Водопользование в бассейнах Волги и Кубани .....	101
4.3. Структуризация водохозяйственных систем .....	103
4.4. Последовательное уточнение стратегий водопользования .....	104
4.5. Заключение.....	113
Глава 5	
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ КАК ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СОГЛАСОВАНИЯ СТРАТЕГИЙ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ .....	114
5.1. Поточковый формализм .....	115
5.2. Целевые функции.....	119
5.3. Рациональное использование водных ресурсов.....	121
5.4. Управление качеством водных ресурсов .....	124
5.5. Рациональное использование водных ресурсов и управление их качеством.....	128
5.6. Оценка платы за водные ресурсы .....	133
5.7. Функционирование регулируемого рынка водных ресурсов.....	136
5.8. Заключение.....	138
Глава 6	
ПОДХОД К СОГЛАСОВАНИЮ СТРАТЕГИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ .....	140
6.1. Введение .....	140
6.2. Согласование стратегий при отсутствии соглашений.....	142
6.3. Согласование стратегий при пересмотре соглашений .....	143
6.4. Заключение.....	148
Глава 7	
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ПРИРОДНОЙ РЕНТЫ.....	149
7.1. Введение .....	149
7.2. Природная рента и возможности ее исчисления .....	150
7.2.1. Определение .....	150
7.2.2. Разделение эффекта и разделение затрат .....	152
7.2.3. Специфика рентной проблемы для различных ресурсов.....	153
7.2.4. Возможности оптимизационного моделирования .....	157
7.2.5. Замыкающие затраты.....	159
7.3 Природная рента и налоговая система.....	161
7.3.1. Распределение и перераспределение природной ренты .....	161
7.3.2. «Рентные платежи» и платежи за использование природных ресурсов в налоговой системе .....	163
7.3.3. Взаимодействие налогов и платежей за использование природных ресурсов.....	165
7.3.4. Специфика законоотвечества в российских условиях.....	166
7.4. Заключение .....	167

Глава 8	
УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДНО-РЕСУРСНЫХ СИСТЕМ.....	169
8.1. Введение.....	169
8.2. Математическая модель оптимального функционирования ВХС.....	170
8.3. Критерий устойчивости функционирования .....	176
8.4. Устойчивость оптимального использования водных ресурсов .....	178
8.5. Устойчивость управления качеством водных ресурсов.....	183
8.6. Заключение.....	187
Глава 9	
УПРАВЛЕНИЕ СОВМЕСТНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД .....	188
9.1. Концепция .....	188
9.2. Подход к выработке стратегий .....	191
9.3. Отображение месторождений подземных вод в модели.....	193
9.4. Имитационная модель.....	200
9.5. Заключение .....	202
Глава 10	
ОБОСНОВАНИЕ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ.....	203
10.1. Введение.....	203
10.2. Математическая модель .....	203
10.3. Математическая модель в обосновании водоохраных мероприятий..	209
10.4. Подход к формированию рынка разрешений на сброс загрязняющих веществ в водоёмы .....	213
10.4.1. Проблема.....	213
10.4.2. Начальное распределение разрешений и его вариации .....	214
10.4.3. Целевые функции и их трансформации.....	217
10.4.4. Функционирование рынка .....	220
10.5. Заключение.....	221
Список литературы .....	223

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема дефицита пресной воды, как все чаще и настойчивее констатируют дипломаты и политики, промышленники и аграрии, экологи и биологи, не говоря уже о гидрологах и специалистах по водному хозяйству, угрожает превратиться в самую острую из глобальных проблем. Потребление воды в мире продолжает быстро расти, и отклик большинства развивающихся стран на рост населения и его желание повысить уровень своего благосостояния приводит, прежде всего, к экстенсивному увеличению объема потребляемых водных ресурсов. Других возможностей у этих стран нет, так как интенсификация предполагает и более высокий технологический уровень хозяйства, и необходимость инвестиций в недоступных для них объемах. Экстенсивное расширение водопотребления влечет сокращение экономически доступных водных ресурсов вследствие нарушений естественных механизмов их воспроизводства. В этом проявляется связь водного кризиса с общим социально-экологическим кризисом современной цивилизации: разрушение природной основы существования человека является следствием неумения распорядиться и тем, что человек получил от природы, и тем, что создал он сам.

Дефицит пресной воды становится фактором, сдерживающим экономический рост многих стран, а следовательно, причиной экономической, социальной, а затем и политической нестабильностей, которые в современном мире не удается удержать в границах одной страны. Это определяет глобальный характер проблемы водного дефицита, несмотря на то, что экономически развитые страны сумели выстроить структуру реального сектора своих экономик так, чтобы даже в тех случаях, когда они не располагают значительными водными ресурсами, зависимость от них практически не сказывалась на темпах развития хозяйства. Этот опыт имеет огромное значение. Он показывает, что проблема дефицита пресной воды в принципе может быть решена. Её решение зависит от того, сумеет ли современная цивилизация осознать свою ответственность перед будущим и разумно распорядиться теми колоссальными возможностями, которыми она располагает уже сегодня благодаря научно-техническому прогрессу и невиданному развитию производительных сил в богатых странах.

Однако как бы ни были значительны научно-технические и экономические достижения, ими надо уметь разумно распоряжаться. Для этого необходимы отвечающие современному уровню науки методы управления водными ресурсами. Эти методы должны обеспечить прогнозы изменения доступных ресурсов, рациональное определение потребности в них и их эффективное распределение между

пользователями, причем все три отмеченных аспекта - разные, но тесно взаимосвязанные стороны единого междисциплинарного проблемного комплекса. Постановка составляющих его задач требует системности, только так можно обеспечить соответствие решения каждой частной задачи общей цели, своего рода «сверхзадаче» - преодолению водного дефицита на основе принципов устойчивого развития, такому решению этой глобальной проблемы, которое способствовало бы гармонизации взаимоотношений и взаимодействий между странами, а не обострению экономических и политических противоречий.

Вряд ли систему управления водными ресурсами в глобальном масштабе следует мыслить как единый «технический проект», разработанный во всех деталях и напоминающий то ли расписание авиарейсов в хорошем аэропорту, то ли инструкцию по эксплуатации сложного прибора. Скорее, она должна представлять собой набор основополагающих принципов, которым надо следовать при постановке отдельных задач, перечень факторов, значимость которых надо понять в каждом конкретном случае - чтобы отобрать существенные именно для него, реестр инструментальных средств, которые могут быть результативно использованы для решения - прежде всего, математических моделей. Конечно, и набор принципов, и перечень факторов, и реестр средств всегда будут открытыми, пополняемыми и модифицируемыми, иначе и не может быть для проблем столь высокой сложности, как управление водными ресурсами.

И позитивный, и негативный опыт управления водным хозяйством и, как модно говорить в последние годы, интегрированного управления водными ресурсами позволяют отметить некоторые важнейшие особенности объекта управления и те следствия, которые вытекают из них для построения и выбора средств управления.

О необходимости комплексного и междисциплинарного подхода уже было упомянуто выше. Она в значительной мере определяется таким свойством объекта управления, как его стохастичность, более того, неопределенность происходящих в нем процессов - как природных, объединяемых понятиями гидрологического цикла, водного баланса, экологического равновесия, климатических изменений, так и социально-экономических, зависящих от рыночной конъюнктуры, размещения производства, научно-технических сдвигов, социальных факторов, политических игр и т.д. Следствие всех этих обстоятельств - целесообразность ориентации на формализацию возникающих задач с помощью стохастического программирования при обязательном использовании детерминистских задач, сочетание динамического и статического подходов, непрерывных и дискретных моделей.

Огромное количество и разнообразие водопользователей, принципиально разные способы использования поверхностных водных объектов и месторождений подземных вод, «встроенность» водопользователей в различные административные и экономические структуры и «контуры» заставляют опираться на принцип «открытого» управления, на подход к разработке плана как игре многих участников с противоположными интересами. Масштабы и сложность системы делают неизбежным и ее рассмотрение как иерархически организованной, точнее, полииерархической, поскольку в ней проявляются и синтезируются несколько

иерархий: природная иерархия речной системы, административная иерархия, временная иерархия, диктуемая необходимостью (более, чем где бы то ни было) рассматривать как сверхдолгосрочные аспекты развития, так и сверхоперативные меры реагирования на ситуации, связанные в негативным воздействием вод со всеми промежуточными горизонтами и периодами.

Важнейшее следствие этого вынужденного нагромождения сложностей - ориентация на интерактивное применение всех формальных компонентов системы (суперсистемы) управления водными ресурсами. По сути эта суперсистема должна представлять собой законодательно определенную, со всеми полномочиями и обязанностями каждого своего звена административную структуру с комплексом систем поддержки принятия решений. Создание подобных суперсистем (для начала на уровне бассейновых управлений, затем - на федеральном уровне, а когда-нибудь, возможно, и на международном уровне) - дело будущего. В данной монографии такая цель не ставится. Мы ограничиваемся общим анализом проблемы глобального дефицита пресной воды, затем, исходя из результатов этого анализа, формализуем отдельные задачи, как части будущей суперсистемы и предлагаем методы их решения.

Во всех задачах, решаемых в данной работе, управление водными ресурсами происходит в рамках природно-технических комплексов - водохозяйственных систем (ВХС), представляющих собой элементы инфраструктуры, согласующие потребности общества в водных ресурсах с возможностью их удовлетворения. Согласование стратегий водопользования рассматривается при неопределённости гидрологических, экологических и социально-экономических условий. Особенностью методологического подхода к выработке согласованных стратегий управления ВХС в условиях неопределённости, развиваемого в данной работе, является учёт, наряду с объёмами реальных водных ресурсов, их ориентиров (гарантированных значений), которые выступают как виртуальные ресурсы, влияющие на хозяйственную деятельность ВХС и смежных с ними систем. Этот подход представил возможность выработать стратегии управления, адаптируемые к возможным изменениям условий функционирования и развития ВХС.

Формализованное представление анализируемых и решаемых проблем согласования стратегий водопользования основывается на потоковой структуре ВХС, в которых существует сеть с потоками воды и примесей, содержащихся в ней. Функционирование и развитие ВХС описывается нелинейными двухэтапными задачами стохастического программирования и управления, в которых потоки, изображающие ориентиры, играют роль стратегических переменных (первого этапа), потоки, соответствующие реализуемым расходам и объёмам водных ресурсов и массам примесей, выступают тактическими переменными (второго этапа). В рассматриваемых задачах случайные процессы поступления и использования водных ресурсов аппроксимируются конечным множеством реализаций. В зависимости от класса рассматриваемых проблем динамика функционирования ВХС представлена в статической постановке, в дискретном или непрерывном времени.

Для удобства восприятия тексты глав монографии, посвященные различным аспектам согласования стратегий водопользования, представлены, по возможности, как самостоятельные фрагменты исследования проблемы управления водными ресурсами. Каждая глава книги имеет свою нумерацию формул, рисунков и таблиц.

Часть результатов, содержащихся в монографии, получены в соавторстве с М.В. Глухих (разделы 3.7 и 9.4), Е.Л. Минкиным (раздел 9.3), С.А. Ивановым (глава 6), Г.А. Ивановым (раздел 10.3) и Д.М. Ярошевым (глава 4).

## Глава 1

# ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ МИРА

### 1.1. Вода в жизни человечества

Вода необходима для возникновения, развития и существования жизни, все процессы, происходящие в биоте (совокупности естественных живых организмов), основаны на воде. Водные ресурсы критически важны и для цивилизации, так как система обеспечения жизни человека построена на «мокрых», т.е. использующих воду технологиях. Как бы ни называли современное общество - постиндустриальным, информационным, постмодернистским, базой его жизнеобеспечения служит производство продовольствия, которое немислимо без воды, как и жизнь самого человека.

Вода - самый важный из вовлекаемых в человеческое хозяйство природных ресурсов, по массе ежегодного использования она намного превосходит все другие добываемые ресурсы, вместе взятые. В процессе потребления ресурсов человечество ежегодно перемещает порядка 300 млрд т грунта и пород (включая вскрышные и вмещающие породы и все прочие непосредственно не потребляемые твердые вещества), тогда как из разнообразных водных источников в конце XX века каждый год отбиралось более 4000 км<sup>3</sup> ( $4 \cdot 10^{12}$  т) воды, по массе на порядок больше остальных природных ресурсов в совокупности [Helmer, 1997], и с тех пор эта величина существенно возросла. Но в процессе хозяйственной деятельности человечество не ограничивается забором воды из природных источников, фактически используя её значительно больше.

Во-первых, в разнообразных технологических процессах и системах производства давно применяется рециклирование воды (повторное и оборотное водоснабжение). Так, например, в США в промышленном секторе в среднем каждый кубический метр воды используется в среднем не менее 20 раз, в России почти половина систем водоснабжения в промышленном секторе построена на основе повторного и оборотного водоснабжения. В целом в мире рециклирование вод лежит в пределах 10 % от ежегодно отбираемой из природных источников водной массы.

Во-вторых, человечество искусственно формирует природно-антропогенные водные объекты - водохранилища и пруды, где вода накапливается и в последующем используется для разнообразных целей: получения энергии, орошения

земель, речного транспорта, рыболовства и рыбоводства, рекреации и т.д. Суммарный объём водохранилищ мира с полным объёмом от 0,1 км<sup>3</sup> составляет порядка 6330 км<sup>3</sup>, а их число превышает 3000 [Авакян, Лебедева, 2002]. Поэтому реальное потребление воды человечеством в конце прошлого века оценивалось величиной 9000 км<sup>3</sup> в год [Helmer, 1997], что по массе в 30 раз превышает потребление всех остальных материалов вместе с перемещаемой при их добыче породой.

В-третьих, человечество использует водные объекты как транзитные и очистные системы, а также для сброса и захоронения отходов. Этот способ водопользования требует наибольших объёмов воды, хотя в расчётах водопотребления он практически не учитывается, видимо, в определённой мере из-за возникающих здесь методологических и информационных трудностей. Между тем глобальный сброс сточных вод составляет величину порядка 2000 км<sup>3</sup> в год, а для приведения качества воды в природном объекте, используемом как приёмник стока, к фоновому сточные воды даже после очистки требуют разбавления в 10-50, а без очистки - до 100-1000 раз. Неудивительно, что практически все реки мира в той или иной степени загрязнены, как и некоторые озёра, замкнутые моря и прибрежные воды, а также верхний горизонт подземных вод. Именно этот способ использования воды, который называют внутрирусловым, является самым водоёмким. Кроме того, заметим, что захороненные и складированные на полигонах твёрдые отходы также служат постоянными источниками загрязнения водных объектов, поскольку вода является универсальным растворителем. Наконец, практически вся эмиссия загрязняющих веществ в атмосферу в конце концов осажается на поверхность планеты в виде сухих и мокрых выпадений, и наиболее значительная часть этих веществ прямо или через перенос стоком оказывается в водных объектах. По оценке, которую Дж. Родда дал в середине 1990-гг. (с тех пор ситуация не улучшилась), загрязняется до 17 тыс. км<sup>3</sup> воды [Rodda, 1997], что составляет более двух третей от современной максимальной оценки её доступного для использования объёма.

Наконец, водные объекты являются средой обитания промысловых рыб и других гидробионтов, составляющих важную, а в ряде стран - преобладающую часть рациона. Не применяющие искусственного орошения сельскохозяйственные предприятия также должны рассматриваться как водопользователи. Вода, транспирируемая возделываемыми растениями, фактически потребляется таким производством. Кроме того, замена естественных экосистем агроценозами неизбежно приводит к изменениям водного режима почвы с разнообразными вытекающими из этого гидрологическими и экологическими последствиями.

Вода обеспечивает три важнейшие для человечества функции: 1) производство продовольствия, 2) производство энергии и промышленной продукции, 3) бытовое водопотребление и удовлетворение санитарно-гигиенических потребностей (помимо транспортных, рекреационных, эстетических и иных функций). Неудивительно, что беспрецедентный рост мировой экономики в XX веке, демографический взрыв, сопутствующее этому увеличение антропогенной нагрузки на экосистемы и природные водные объекты стали причиной возникновения нехватки воды во многих регионах мира. Человечество знакомо с дефицитом воды

едва ли не с момента своего возникновения, но его сегодняшние масштабы беспрецедентны.

Обострение дефицита пресной воды стало одним из главных сюжетов в сценариях будущего. В послании по случаю Всемирного дня окружающей среды в 2003 г. Генеральный секретарь ООН напомнил: «Два миллиарда человек отчаянно нуждаются в пресной воде». Кроме того, еще два миллиарда имели немало случаев познакомиться с дефицитом воды на практике. По оценкам Всемирного Банка, на существенное изменение ситуации в ближайшие 50 лет рассчитывать не приходится: к середине XXI века 40 % населения Земли будет испытывать дефицит воды, 20 % - серьезно страдать от него. Этот безрадостный прогноз не учитывает глобальных изменений климата, которые, по всей вероятности, могут лишь усугубить ситуацию. Пророчества водных войн, грандиозные проекты перераспределения речного стока или буксировки антарктических айсбергов к берегам пустынь заполняют СМИ. Активно обсуждаются не только меры по преодолению дефицита воды, не выходящие за границы национальных экономик, но и международные аспекты. Именно поэтому вода стала предметом дискуссий на всех крупнейших форумах планеты последних 20 лет: на Конференции по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро в 1992 г., на заседании Генеральной Ассамблеи ООН «Рио+5» (1997 г.), посвященном итогам выполнения положений конференции в Рио-де-Жанейро, на Саммите Тысячелетия (2000 г.), на Всемирном саммите по устойчивому развитию «Рио+10» в Йоханнесбурге (Южно-Африканская республика) в 2002 г.

В связи с огромной важностью водных проблем 2003-й год был объявлен ООН Международным годом пресной воды, проведено множество национальных и международных мероприятий - научных, общественных, экономических конференций и семинаров. Были сформулированы семь основных направлений будущих действий:

- удовлетворение базовых потребностей людей в безопасной питьевой воде и в канализации;
- обеспечение продовольственной безопасности посредством более эффективного использования водных ресурсов;
- защита экосистем и обеспечение их целостности путем управления водными ресурсами;
- совместное использование как различными хозяйствующими субъектами, так и государствами водных ресурсов на основе управления ими;
- защита от опасностей, связанных с водой, путем управления рисками;
- управление водными ресурсами на основе определения ценности воды в экономическом, социальном, экологическом, культурном смысле и установления такой цены на воду, которая не ляжет тяжелым бременем на бедные и уязвимые слои населения;
- рациональное управление водными ресурсами при общественном контроле и соблюдении интересов всех слоев населения.

Позднее эти направления были дополнены еще четырьмя:

- развитие более экологически безопасной промышленности, не наносящей ущерба качеству воды и потребностям в ней других потребителей;
- учёт ключевой роли воды в выработке энергии для обеспечения растущих потребностей в ней;
- значение воды для быстро урбанизирующегося мира;
- обеспечение доступности для всех информации о водных ресурсах и водопользовании.

## 1.2. Запасы воды на Земле

Запасы воды на Земле колоссальны, но возможность их использования ограничена в первую очередь природными факторами, в том числе экологическими (хотя все еще нередко встречаются оценки, например, гидроэнергетического потенциала, при расчёте которых экологические ограничения совсем не принимаются во внимание). Огромная масса воды в Мировом океане имеет высокую солёность, запасы пресной воды в ледниковых покровах малодоступны из-за удалённости и состояния в твердой фазе, как и грунтовые льды многолетнемерзлых пород. Значительная часть подземных вод минерализована и залегает на больших глубинах, половина массы озёрной воды также засолена. Поэтому количество пресной воды, доступной для потребления, оказывается существенно ограниченным (в сопоставлении с современными потребностями цивилизации).

В табл. 1.1 приведены оценки запасов воды на планете и некоторые их характеристики (см. также [Клиге и др., 1998]). Что касается экологических ограничений, то они определяют, в частности, объёмы изъятия пресной воды из водного объекта, допустимые с позиций сохранения воспроизводимости водных ресурсов и водных экосистем, обеспечения неистощительности водопользования. Из табл. 1.1 видно, что масса пресной воды во всех природных объектах составляет примерно 35 тыс. км<sup>3</sup>, или около 2,5 % от массы всей воды. Но речные воды - возобновляемый ресурс (возобновление происходит в среднем через каждые 16 дней), а средний годовой сток рек мира составляет около 50 тыс. км<sup>3</sup>. Доступные для использования ресурсы пресной воды оцениваются примерно в 24 тыс. км<sup>3</sup>. На рис. 1.1 показан рост потребления воды в XX веке и сценарии его роста на ближайшие десятилетия, а также динамика потеря воды в результате загрязнения и иных антропогенных воздействий.

Оценки потребления воды в мире и его роста в XX веке приведены в табл. 1.2. Эти данные свидетельствуют о беспрецедентном росте, происходившем в прошлом столетии. Он, как и многие другие показатели хозяйственной деятельности, носит взрывной характер (рис. 1.2).

Водообеспеченность стран мира (количество водных ресурсов в расчёте на одного жителя) представлена на карте (рис. 1.3). Долгосрочные прогнозы динамики водообеспеченности, исходящие из демографических прогнозов и предположения о неизменности объёма доступных водных ресурсов, неутешительны.

Таблица 1.1.

Оценки количества воды в различных природных объектах; [Rodda, 1997], с модификациями

Природные объекты	Объём (10 <sup>3</sup> км <sup>3</sup> )	% от общей массы	% пресной воды	Годовой оборот	Время замещения
Океан	1338000	96,5	-	505000	2600 лет
Подземные воды до 2000 м	23400	1,7	-	-	-
Пресные подземные воды	10530	0,76	30,1	-	-
Ледники и вечные снега	24000	1,74	68,7	-	-
Антарктика	21600	1,56	61,7	-	-
Гренландия	2340	0,17	6,68	2477	9700 лет
Арктические острова	83,5	0,006	0,24	-	-
Горные ледники	40,6	0,003	0,12	25	1000 лет
Грунтовые льды (мерзлота)	300	0,022	0,86	30	10000 лет
Озера	176,4	0,013	-	10400	17 лет
Пресные озера	91	0,007	0,26	-	-
Соленые озера	85,4	0,006	-	-	-
Марши, болота	11,5	0,0008	0,03	2294	5 лет
Реки	2,12	0,0002	0,006	49400	16 дней
Биологические объекты	1,12	0,0001	0,003	-	-
Атмосфера	12,9	0,001	0,004	600000	8 дней
Все объекты	1386000	100	-	-	-
Объём пресной воды	35000	2,53	100	-	-



Рис. 1.1. Потребление воды и сокращение её ресурсов [Данилов-Данильян, 2009]

Водообеспеченность в мире в расчёте на одного человека в 2002 г. уменьшилась в сравнении с 1970 г. почти вдвое, однако к 2050 г. следует ожидать её даль-

нейшего снижения в сравнении с 2002 г. в полтора раза. На самом деле ситуация может оказаться ещё менее благоприятной, если не удастся переломить тенденцию ухудшения качества воды в природных источниках по антропогенным причинам, кроме того, климатологические прогнозы указывают на высокую вероятность ухудшения условий водопользования из-за изменения режима осадков (в большинстве регионов предполагается увеличение их неравномерности в течение года).

Таблица 1.2.

**Динамика использования воды на континентах в км<sup>3</sup> в год [Shiklomanov, Balonishnikova, 2003].**

Континенты	1900	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000
Европа	37,5 13,8	96,1 38,1	136 50,5	226 88,9	325 122	449 177	482 198	463 197
Северная Америка	69,6 29,2	221 83,8	287 104	410 138	555 181	676 221	653 221	705 243
Африка	40,7 27,5	49,2 32,9	55,8 37,8	89,2 61,3	124 87,0	166 124	203 150	235 170
Азия	414 249	682 437	843 540	1163 751	1417 890	1742 1084	2114 1315	2357 1458
Южная Америка	15,1 10,8	32,6 22,3	49,3 31,7	65,6 39,6	87,0 51,1	117 66,7	152 81,9	182 96
Австралия и Океания	1,6 0,6	6,8 3,3	10,4 5,0	14,5 7,2	19,9 10,3	23,5 12,7	28,5 16,4	32,5 18,7
Сумма (округленно)	579 331	1088 617	1382 768	1968 1086	2526 1341	3175 1686	3633 1982	3973 2182

Примечание: верхний ряд - полное водопотребление, нижний - безвозвратное

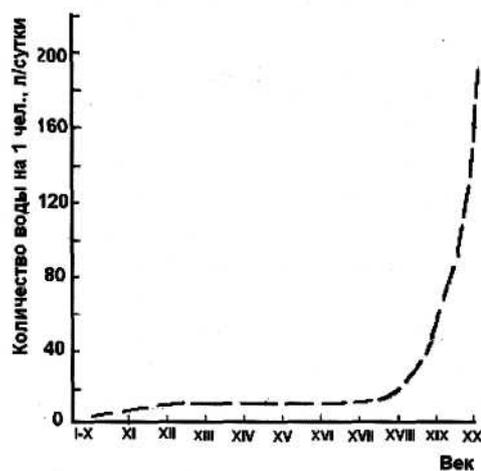


Рис. 1.2. Рост потребности в бытовой воде за последние 2000 лет по миру в целом [Данилов-Данильян, 2009]

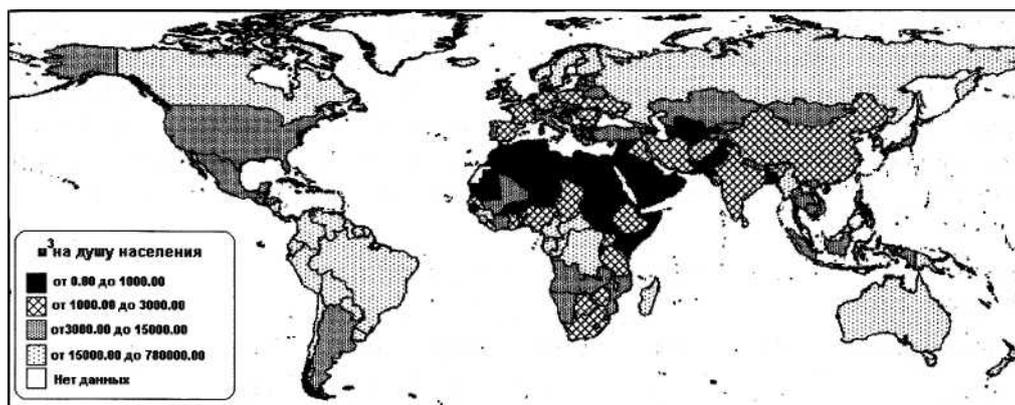


Рис. 1.3. Водные ресурсы на душу населения [Данилов-Данильян, Лосев, 2006]

### 1.3. Загрязнение воды и его последствия

Использование воды для транзита, очищения и захоронения отходов имеет исключительно важное экологическое значение, которое еще недостаточно оценено даже специалистами - экологами и гидроэкологами, и создаёт проблему загрязнения естественных водных объектов, от практического решения которой человечество сейчас очень далеко. Если такое решение возможно, для него потребуются многие десятилетия.

Как отмечено выше, жизнь построена на «мокрых» технологиях. Материализованная в биоте, она представлена гидрофильными организмами с очень высокой скоростью водообмена по сравнению с биокосными (абиотическими) системами. Масса биоты на 6 порядков меньше массы биокосного вещества в биосфере, по индивидуальному размеру тел организмы меньше биокосных систем на 17 порядков (в среднем), но интенсивность водообмена в них гораздо выше. Например, в кровеносной системе человека интенсивность водообмена на 16 порядков больше, чем в океане [Хайлов, 1998]. Высокие темпы водообмена позволяют биоте Мирового океана дважды в год пропускать через тела своих организмов всю его водную массу, а биота суши в процессе транспирации многократно пропускает через себя выпадающие на суше осадки. Поэтому, как отмечал Н.В. Тимофеев-Ресовский еще в 1968 г., биота формирует концентрации веществ в водных объектах, а в Мировом океане она поддерживает соотношение концентраций основных биогенов (число Редфилда), совпадающее с соотношением их концентраций при синтезе органики. Высокая интенсивность водообмена в живых организмах означает, что масса загрязняющих веществ, попадающая в водные объекты, в процессе водообмена непрерывно поступает в тела живых организмов, включая человека. Затем она участвует в процессе метаболизма и полного или частичного вывода из организма его продуктов. Таким образом, биота (и человек как часть биоты) оказывается одновременно и очистным устройством, и местом депонирования отходов.

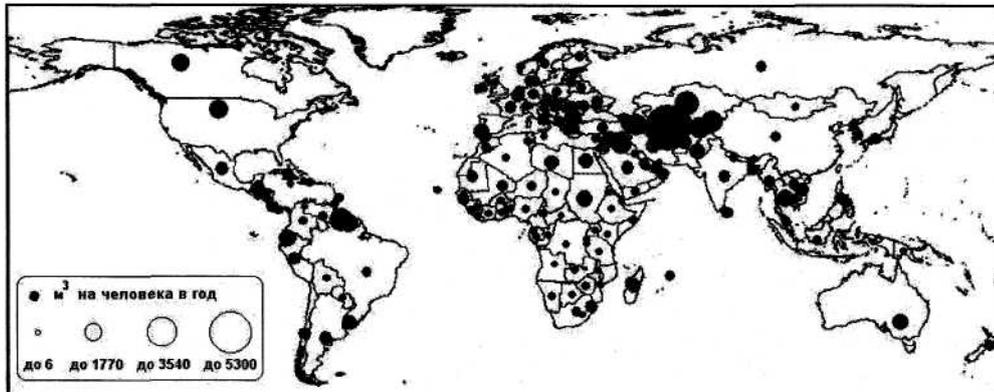
Человеку на физиологические нужды необходимо потреблять примерно 2,5 л воды в сутки. Для удовлетворения бытовых потребностей, в первую очередь санитарно-гигиенических, современному городскому жителю в сутки требуется от 180 до 250 л. Основное потребление воды биотой земной суши осуществляется при производстве органики в процессе фотосинтеза. Для синтеза 1 г органики требуется от 100 г воды и более в зависимости от вида растения. Остальное потребление воды составляет небольшую долю от потребностей синтеза. Синтез органики является важнейшим гидрологическим процессом, так как он обеспечивает через транспирацию континентальный влагооборот. Таким образом, биота контролирует этот влагооборот [Горшков, 1995; Лосев и др., 1993].

Гигантскими являются потребности в воде промышленности и сельского хозяйства. Для выплавки 1 т чугуна и перевода его в сталь необходимо 50-250 м<sup>3</sup> пресной воды, для производства 1 т азотной кислоты - 80-180 м<sup>3</sup>, хлопчатобумажной ткани - 300-1100 м<sup>3</sup>, синтетического волокна - 1000 м<sup>3</sup>, целлюлозы - 200-400 м<sup>3</sup>, резины - 2500 м<sup>3</sup>, синтетических тканей - 2000-3000 м<sup>3</sup>. Огромные объёмы воды потребляют энергетические установки для охлаждения энергоблоков, причём значительная её часть (порядка 30 %) уходит в безвозвратные потери. Так, для работы ТЭС мощностью 1 млн кВт необходимо 1-1,6 км<sup>3</sup> воды в год, а для работы АЭС той же мощности - от 1,6 до 3 км<sup>3</sup>. Нижние границы этих интервалов соответствуют самому передовому современному техническому уровню. Для выращивания 1 т пшеницы, продаваемой на мировом рынке, в среднем требуется 1 тыс. м<sup>3</sup> воды (водоёмкость пшеницы, выращиваемой для внутреннего потребления, может быть в несколько раз ниже, но за счёт колоссальных затрат труда).

Использование воды ведет к её загрязнению. Производство практически любого вида продукции включает транзит воды через технические системы и включение в неё весьма разнообразных веществ. Фекальные загрязнения водных объектов появились вместе с возникновением и развитием городов, т.е. не позднее 6 тыс. лет назад. Активное загрязнение органическими веществами связано с развитием и распространением сельского хозяйства и относится ко времени 500-1000 лет назад. Особенно много новых видов загрязняющих веществ появилось в XX веке. В 1900-е гг. началось антропогенное засоление (минерализация) водных объектов, в период между 1910 и 1920 гг. в сточных водах в значительных количествах появляются тяжёлые металлы, после 1930 г. растёт сброс органических веществ, после 1940 г. начинается эвтрофирование водных объектов, в 1950-е гг. отмечено поступление радионуклидов, а после 1960 г. - закисление вод. Именно загрязнение водных объектов в настоящее время служит основной причиной дефицита водных ресурсов.

Экологические последствия потребления водных ресурсов связаны не только с величиной водозабора (значения этой величины для стран мира показаны на рис. 1.4), но и со структурой использования воды (рис. 1.5). В мире основная масса потребляемой воды - 70 % - используется в сельском хозяйстве, в основном для орошения (рис. 1.6). Значительную часть воды - 20 % - расходует индустрия, а оставшаяся вода - 10 % - направляется в коммунальное хозяйство [Состояние..., 2000]. Индустриальное потребление воды преобладает в относительно небольшом количест-

ве стран Европы, в России, Канаде и Австралии, т.е. в развитых индустриальных странах. В США затраты воды в промышленности и в сельском хозяйстве примерно равны. В остальных странах в водопотреблении доминирует сельское хозяйство.



1.4. Водозабор на душу населения, м<sup>3</sup>/чел. (2000 г.) [Данилов-Данильян, Лосев, 2006]

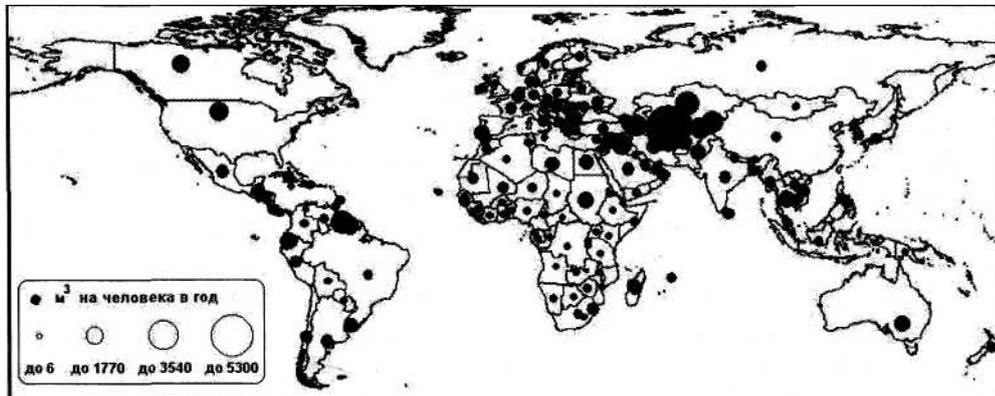


Рис. 1.5. Структура водозабора, м<sup>3</sup>/чел. (2000 г.) [Данилов-Данильян, Лосев, 2006]

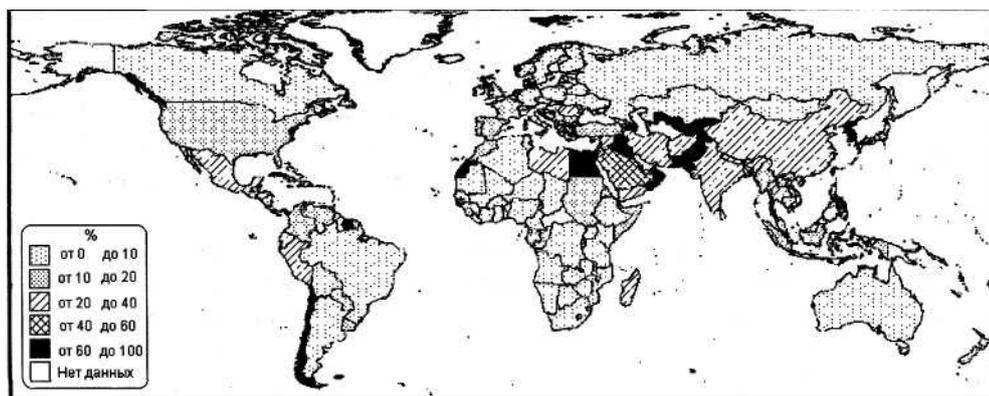


Рис. 1.6. Орошаемые земли, % от общей площади пашни (2000 г.) [Данилов-Данильян, Лосев, 2006]

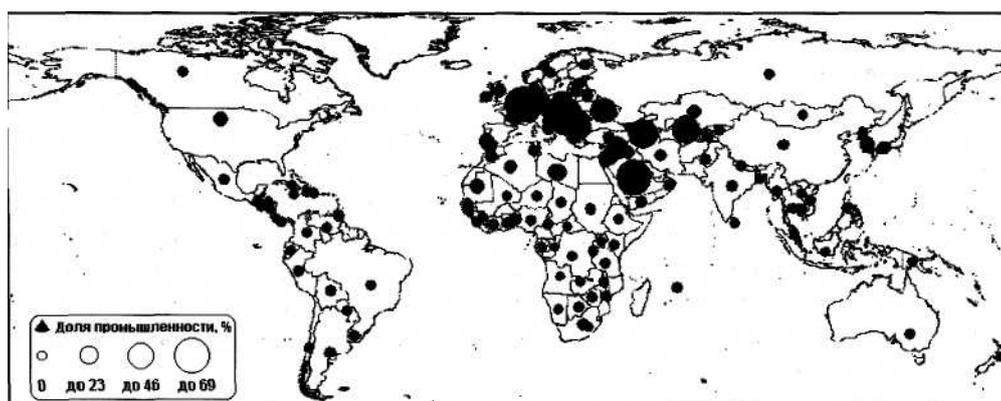
Потребление воды для сельскохозяйственных нужд ведет не только к загрязнению и эвтрофированию водных объектов, но и к другим серьезным экологическим последствиям из-за изъятия из них больших объемов воды. Использование воды для орошения часто приводит к деградации сельскохозяйственных земель в результате избыточных поливов. В таких условиях поднимается уровень грунтовых вод, происходит вторичное засоление почвы, возникает подтопление хозяйственных объектов. Засоленные земли выпадают из хозяйственного оборота. Ежегодно площадь таких земель прирастает на 1,5 млн га [Состояние..., 2000].

Плотины и водохранилища, водоотводящие системы на реках влекут изменения режима водных объектов. Водоохранилища срезают пики паводков, в результате уменьшаются площади затопления поймы ниже по течению, снижается количество наносов, что ведет к размыву русла; из-за подтопления в зоне водохранилища происходит заболачивание земель. Ниже водохранилищ исчезают заливные луга и высыхают нерестилища, происходит изменение состава рыбных и других ресурсов, нарушение водных экосистем, разрушение пойменных и устьевых ветландов вплоть до их полного уничтожения. Изменяется качество воды, её физические свойства, солевой состав, содержание биогенов. Площадь, на которой происходят те или иные изменения при создании водохранилищ, не уступает площади самих водохранилищ. Как уже отмечалось, на начало XXI века в мире насчитывалось более 3 тыс. водохранилищ с полным объемом от 0,1 км<sup>3</sup> и выше, объем воды в них составляет 6330 км<sup>3</sup> [Авакян, Лебедева, 2002]. Большинство крупных рек мира в настоящее время управляются человеком, и их водный режим не соответствует естественному.

Хотя доля водозабора из подземных источников в общем объеме водозабора невелика (порядка 10 %), во многих регионах мира подземные воды широко используются для питьевого водоснабжения и орошения. Орошаемое земледелие сконцентрировано в Китае и на субконтиненте Индостан, в Центральной Азии, Северной Африке и на тихоокеанском побережье Южной Америки (см. рис. 1.6). Значительные территории орошения находятся также в США. Так, в Китае 70 % урожая зерновых обеспечивается за счет орошения, в Индии - 50 %, в США - 15 %. Во всех этих странах доля подземных вод в орошении весьма велика. В Центральной и Западной Европе питьевое водоснабжение идет в основном за счет подземных вод. Интенсивное использование подземных вод приводит к понижению их уровня и нередко к ухудшению качества воды, т.е. к истощению и деградации подземных водных объектов. Падение уровня подземных вод наблюдается в южной части Великих равнин в США, в Северной Африке и на Ближнем Востоке, на большей части территории Индии и почти повсеместно в Китае. При этом скорость понижения уровня подземных вод измеряется метрами в год. Это ведет к исчерпанию их запасов вследствие нарушения баланса между пополнением и водозабором подземных вод. Понижение уровня подземных вод сопровождается также просадками и понижениями поверхности [Состояние..., 2000].

Индустриальное загрязнение обеспечивает исключительное разнообразие поллютантов в природных водах - от самых опасных, как, например, диоксины или радионуклиды, до практически нейтральных. Чем больше возобновляемых

водных ресурсов используется в индустрии страны, тем больше образуется сточных вод. На рис. 1.7 представлены доли возобновляемых водных ресурсов, приходящиеся на промышленное потребление. Наиболее крупными источниками индустриального загрязнения природных вод в развитых странах служат точечные источники - трубы сброса сточных вод. Эти источники с нарастающим темпом создавались по мере индустриализации, но только в XX веке, в основном его второй половине, начали устанавливать сооружения для очистки сточных вод. Однако нет таких очистных сооружений, которые бы обеспечивали 100 % очистки. В результате некоторый уровень загрязнения водных объектов сохраняется. Для достижения нормативных или фоновых значений качества воды обычно требуется определённый уровень разбавления сбрасываемых очищенных сточных вод.



**Рис. 1.7. Потребление воды в промышленности в процентах от общих возобновляемых водных ресурсов [Данилов-Данильян, Лосев, 2006]**

Сверхпотребление воды из многих рек и подземных резервуаров ведет к изменению режима водных объектов в результате преобразования естественных экосистем на водосборах, в зонах питания подземных вод и строительства разнообразных гидротехнических сооружений в пределах самих водных объектов. Всемирная комиссия по воде (World Commission on Water) отметила в 1999 г., что более половины крупных рек мира «серьезно истощены и загрязнены, деградируют и отравляют окружающие их экосистемы, угрожая здоровью и жизнеобеспечению зависящего от них населения» [Глобальная..., 2002].

Изменение величины и режима речного стока, загрязнение водных объектов ведут к нарушению цикла жизни гидробионтов, сокращению их популяций и исчезновению видов. За последние 20 лет около 10 тыс. видов пресноводных рыб оказались угнетенными, численность их стала снижаться или они уже исчезли. Перспективы существования 100 тыс. пресноводных видов позвоночных и не меньшего количества видов беспозвоночных животных, водорослей, бактерий и протозоа, обитающих в донных отложениях, неопределённые, но биологи не сомневаются в том, что эти виды весьма чувствительны к изменениям уровня воды, её химическому составу, величине стока и другим гидрологическим характеристикам [Postel, 2003]. Изменение водного режима человеком инициирует деграда-

ционный процесс с положительной обратной связью, поскольку сокращение численности и уменьшение биоразнообразия этих организмов нарушает их биосферную функцию, влечет снижение их потенциала в регулировании химического состава вод для поддержания устойчивости водной среды и водных экосистем.

Традиционное деление природных ресурсов на невозпроизводимые и воспроизводимые все более утрачивает абсолютный характер и, к сожалению, не потому, что у человека появилась возможность обеспечить возобновление первых. Наоборот, чрезмерное воздействие экономики на окружающую среду стало причиной, из-за которой некоторые воспроизводимые ресурсы, наиболее уязвимые для антропогенных факторов, стали утрачивать свойство возобновимости [Данилов-Данильян, Лосев, 2000]. Это не относится, например, к солнечной радиации, годовую величину которой в любых экономических расчётах принимают неизменной, энергии приливов и отливов, гидротермальным источникам и т.п. Однако этот феномен имеет место для всех биологических ресурсов, процессы воспроизводства которых ослабевают в результате чрезмерной эксплуатации, загрязнения окружающей среды и нарушений (тем более - уничтожения) компонентов природных систем, необходимых для жизнедеятельности сообществ организмов, составляющих такие ресурсы.

К природным ресурсам, весьма чувствительным к всевозможным вмешательствам в процессы их возобновления, как показано выше, относятся и водные ресурсы, вопреки распространенному мнению об их неограниченной воспроизводимости. Известно множество примеров, когда в результате антропогенных воздействий водные источники иссякали, качество пресной воды ухудшалось настолько, что она становилась непригодной для питья даже после обработки стандартными технологиями водоподготовки (опреснение, применяемое для морской воды, при этом не имеется в виду). Ресурсы пресной воды воспроизводимы, но их воспроизводимость относительна. Это обстоятельство обуславливает необходимость охраны вод - особенность, присущая использованию биологических ресурсов (в том числе земли, поскольку охрана земель в первую очередь предполагает сохранение плодородия почвы, то есть, прежде всего, почвенной биоты). Однако это свойство радикально отличает воду от всех минеральных ресурсов. Водопользование, как и любая активность по эксплуатации природных ресурсов, предполагающая воздействия на окружающую среду, порождает разнообразные экстерналии (эффекты, внешние по отношению к рынку и не учитываемые в системе рыночных цен). Наиболее значимые среди них связаны с необходимостью охраны вод. Результаты, обуславливаемые затратами на охрану вод, в основном, проявляются за пределами горизонта видения, доступного рыночным средствам оценивания.

#### **1.4. Последствия нерационального водопользования**

Среди антропогенных воздействий, особенно опасных с позиций воспроизводимости водных ресурсов, выделяются: чрезмерный забор воды (как из поверхностных, так и подземных источников), горные выработки, мелиоративные

системы, гидротехнические сооружения, дорожное строительство, загрязнение водных объектов сбросом загрязненных стоков, смыв поллютантов с сельскохозяйственных угодий и территорий городов паводками либо дождями, молевой лесосплав, воздушный перенос загрязнений. Важнейшим фактором, обуславливающим деградацию водных объектов, служит уничтожение или угнетение экосистем, обеспечивающих воспроизводство водных ресурсов в качественном и количественном аспектах - лесов, верховых болот, лугов, речных и озёрных экосистем. Нельзя признать достаточно изученными механизмы таких воздействий и взаимодействий, прежде всего, на количественном уровне, хотя качественно картина, как правило, понятна.

Тенденция к утрате водными ресурсами свойства воспроизводимости тесно связана с общим экологическим неблагополучием на планете и его непрерывным усилением. Крайне тревожно то обстоятельство, что ухудшение состояния окружающей среды происходит прежде всего в развивающихся странах и именно там, где наблюдается острый дефицит пресной воды. В таких регионах формируется контур положительной (усилительной) обратной связи: дефицит обуславливает такое водопотребление, когда превышает допустимая нагрузка на водные источники, а это превышение инициирует деградационные процессы в гидро- и экосистемах, в результате которых происходит истощение водных источников и ухудшение качества воды в них, так что в результате дефицит растет, и т.д. Стереотип мышления подталкивает к экстенсивному способу: надо обеспечить увеличение количества того, чего не хватает, в нашем случае - забор свежей воды из водных объектов. Но этот способ не только инициирует образование описанного контура положительной обратной связи, но и закрепляет его - вырваться из порочного круга становится все труднее. Приведенная на рис. 1.8 схема отображает процесс образования и усиления водного дефицита.



**Рис. 1.8. Процесс формирования и усиления водного дефицита**

Дефицит пресной воды будет нарастать, если не остановить процесс экологической деградации. Отсюда следует вывод: необходимым условием решения проблемы дефицита пресной воды является снижение антропогенного воздействия на окружающую среду до безопасного уровня, экологизация производства и потребления, сохранение и восстановление необходимого для экологического баланса количества неугнетенных экосистем.

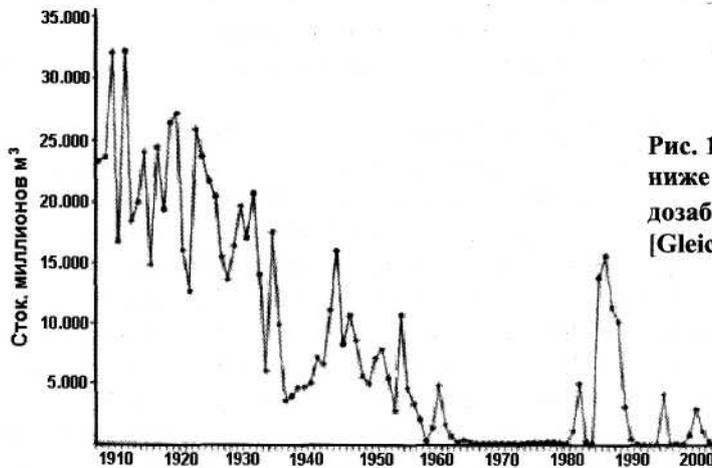
В мире хорошо известно об Аральской катастрофе. В результате использования стока двух центральноазиатских рек - Амударьи и Сырдарьи для орошения, а также других видов водопотребления из этих источников и воздействия на них, в конце концов, эти водотоки практически перестали доставлять воду в Аральское море. В результате площадь акватории Аральского моря стала быстро сокращаться.

Строительство плотин и водозаборных сооружений на Амударье и Сырдарье в широком масштабе началось с 1960 г. и уже в 1981-1990 гг. сток рек в Аральское море упал с 60 до 7 млрд м<sup>3</sup> в год, а затем почти прекратился. К ноябрю 2002 г. абсолютный уровень Аральского моря упал по сравнению с 1960 г. на 23 м и находился на отметке 30,47 м над уровнем океана. Площадь водоема уменьшилась с 66 до 15 тыс. км<sup>2</sup>, объем воды в нем сократился с 1060 км<sup>3</sup> приблизительно до 100 км<sup>3</sup>. По существу море распалось на три независимых водоема. Из квазипресноводного водоема Арал превратился в соленое озеро с соленостью 90 ‰ в западной части и до 160 ‰ - в восточной части Большого моря. Это привело к гибели эндемичной фауны, море стало практически безжизненным, значительно сократилось число видов планктона, выжило только два вида рыб - камбала и атерина в западной части Большого моря. В западной части Большого моря на глубине 22 м обнаружен слой сероводородного заражения, что представляет новую проблему для Арала [Косарев, Костяной, 2003].

Однако Аральская экологическая катастрофа - не единственная и не первая, обусловленная хозяйственным использованием значительной части стока крупных рек, хотя по масштабам и трагичности последствий она превосходит все аналогии. Первая в Новое время экологическая катастрофа типа Аральской произошла в США на реке Колорадо еще в начале 1950-х гг., но тогда она не привлекла серьезного внимания, так как человечество пребывало в эйфории покорения природы; немаловажно и то, что Колорадо впадает не в замкнутый водный объект, а в океан. В результате сооружения 10 плотин и разбора воды на орошение сток реки в нижнем течении упал с 9 млрд м<sup>3</sup> в 1922 г. до 2-3 млрд м<sup>3</sup> в год в 1950-х гг., а в 1965 г. практически прекратился, появляясь только в годы с необычно большими осадками (рис. 1.9). Сейчас экологические катастрофы типа Аральской (хотя и не столь значительные по масштабам) стали отнюдь не исключительным явлением.

Еще одна подобная катастрофа развивается в дельте реки Хуанхэ. На гидрологической станции Личжин в нижнем течении реки число дней с нулевым стоком в год составляло в 1980-1989 гг. 36, а в 1990-1997 гг. в результате разбора воды на орошение - 226. Признаки катастрофы типа Аральской наблюдаются на реке Нил, где сток в устье упал с 32 млрд м<sup>3</sup> в год до сооружения Асуанской плотины до 1,8 млрд м<sup>3</sup> в год в настоящее время. Катастрофическое снижение стока и пересыхание в сухой сезон регистрируется на реке Ганг. Подобная участь ожидает

и другие реки, менее крупные, например Иордан на Ближнем Востоке [Brown, Ayres, 1998; Xia Jun et al., 2001].



**Рис. 1.9. Сток реки Колорадо ниже главных плотин и водозаборов в 1905–2001 гг. [Gleick, 2003]**

Последствия таких катастроф несколько смягчены в сравнении с Аральской тем, что перечисленные и другие крупные реки с зарегулированным стоком впадают не в замкнутый водоем, как Сырдарья и Амударья, а в Мировой океан. Тем не менее, резкое сокращение стока, например, в дельте реки Нил уже привело к её постепенному разрушению и отступанию, а также деградации её экосистемы. Количество видов рыбы для коммерческого вылова в Ниле сократилось с 47 видов до 17, а запасы сардины в восточной части Средиземного моря упали на 83 % в связи с прекращением выноса нильского ила, органика которого служила ей пищей.

На ряде небольших рек всех континентов уже сегодня произошли или развиваются гидроэкологические миникастрофы. Примером может служить река Тарим в Синьцзян-Уйгурском автономном районе Китая. Когда-то она впадала в озеро, но в настоящее время нижний участок реки длиной 300 км остается без поверхностного стока.

Интенсивное использование пресной воды, поступающей в Мёртвое море, с начала 1960-х гг. привело к нарушению его водного баланса. Испарение стало превышать приток и атмосферные осадки на поверхность озера. В результате уровень Мёртвого моря понижается. В настоящее время он понизился ниже порога в проливе Линча, соединявшего южную и северную части моря, поэтому южный бассейн высох и сейчас используется как система испарительных прудов для производства солей, вода в которые закачивается из северного бассейна. Длина Мертвого моря уменьшилась с 80 до 50 км, сократились площадь и максимальная глубина, увеличилась соленость воды. Катастрофические события произошли также с озером Чад в Северной Африке, поскольку сток впадающих в него рек разбирается на орошение. За последние 40 лет поверхность озера сократилась с 25 тыс. км<sup>2</sup> до 1359 км<sup>2</sup>, глубина воды с 10 до 1-2 м, а 50 % площади сохранившейся аквато-

рии заросло. Следствием этого стало засоление почв, гибель посевов, исчезновение рыболовства, обнищание местного населения [Косарев, Костяной, 2003].

Возрастающая вместе с численностью населения Земли потребность в продовольствии и стремление удовлетворить эту потребность применением технологий орошаемого земледелия - главная причина глобального процесса преобразования водосборов многих рек. Происходит разрушение естественных экосистем и замена их техническими системами, активное изъятие воды из возобновляемых источников, перераспределение поверхностного стока, разрушения водных и пойменных экосистем, нарушение водного баланса подземных вод на больших территориях. Существенный вклад в этот процесс вносит и тотальное загрязнение водных объектов всеми отраслями современной экономики. Происходит интенсивная деградация водных экосистем, особенно ветландов - водно-болотных угодий с высоким уровнем биоразнообразия. В настоящее время в мире утрачено около половины водно-болотных угодий, в результате чего исчезло более 20 % из 10 тыс. известных в мире пресноводных видов. Во многих регионах мира водные ресурсы перестали возобновляться в прежнем количестве и качестве в пределах естественных флуктуации, т.е. фактически стали превращаться в невозобновляемые ресурсы.

Огромный объём потребления воды человечеством и быстрый рост этого объёма (только в XX веке водопотребление увеличилось в шесть раз и более чем вдвое превысило темпы роста населения) не повлекли за собой сходного по темпам или масштабам водосбережения, рационализации использования воды и развития водосберегающих технологий. Из всей массы воды, потребляемой в сельском хозяйстве, 60 % идет на непродуктивное испарение и возвращается в реки и подземные воды в виде загрязненной воды. Потребление воды в городах и промышленности также крайне непроизводительно. В развивающихся странах в результате утечек в системах водоснабжения, незаконных подключений к этим системам и неэффективного использования теряется до 50 % воды, забираемой из источников. Во многих развитых странах этот процент также достаточно высок.

### **1.5. Экстенсивное и интенсивное водопользование**

XX век был веком небывалого научно-технического и экономического рывка. Развитие экономики отдельных стран и мира в целом требовало все больше воды для сельского хозяйства, промышленности, бытовых нужд и получения энергии. Научно-технический прогресс обеспечивал также появление новых очень водоёмких секторов экономики - например, атомной энергетики, химии полимеров - при явном отставании технологий как водообеспечения, так и охраны вод. Важнейшим фактором роста потребления воды было также увеличение численности населения. Однако плоды научно-технического прогресса в XX веке неравномерно распределялись между отраслями экономики. В наименьшей степени этими плодами оказались обеспеченными природоэксплуатирующие отрасли, в том числе, как правило, главные водопользователи.

Усилия водохозяйственных органов были направлены, прежде всего, на изъятие всё больших объёмов воды из водоисточников, на всё большее вмешательство в гидрологический цикл для удовлетворения растущих нужд в пресной воде. Сооружение плотин с огромными водохранилищами, каналов для переброски воды, водозаборов для удовлетворения потребностей коммунального хозяйства и промышленности, бурение скважин для добычи подземных вод и строительство сетей водопроводов, иными словами, создание огромной водохозяйственной инфраструктуры стало основным средством удовлетворения растущих потребностей разных секторов хозяйства.

В результате около 60 % из 227 крупнейших рек мира расчленены плотинами, водозаборами или каналами. В течение XX века и особенно в последние 50 лет воздействие человека на водный цикл планеты только за счет гидротехнического строительства достигло глобального масштаба. К 1950 г. было построено 5 тыс. плотин высотой более 15 м. Сейчас таких плотин насчитывается более 45 тысяч. В последние полвека в мире создавалось в среднем по две такие плотины в день [Postel, 2003]. Темпы роста числа плотин и водохранилищ в мире в XX веке приведены в табл. 1.3; на рис. 1.10 показана динамика строительства крупных водохранилищ, в табл. 1.4 перечислены 10 крупнейших водохранилищ мира с указанием их объёма.

Рис. 1.11 представляет данные о площадях и объёмах водохранилищ по материкам, а рис. 1.12-0 динамике распределения крупных водохранилищ по материкам.

Водное хозяйство развивалось под давлением текущих, кратко- и среднесрочных экономических интересов, однако долгосрочные перспективы и последствия этого развития не анализировались системно и недостаточно принимались во внимание при выборе соответствующих мер. Не учитывался воспроизводственный по-

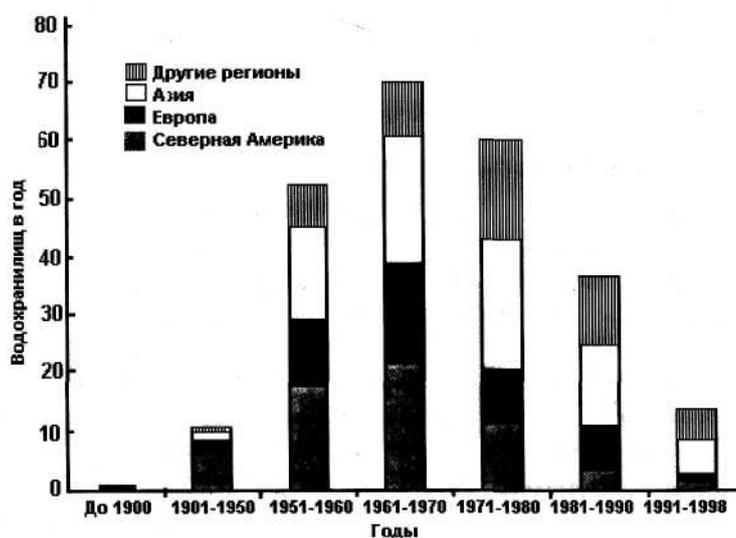


Рис. 1.10. Строительство крупных водохранилищ в XX веке [Максаковский, 2003]

тенциал природных гидросистем, воздействие на них не только непосредственно водного хозяйства, но всех остальных отраслей экономики, не разрабатывались долгосрочные прогнозы изменений потребности в пресной воде. И хотя в XX веке

Таблица 1.3.

Динамика создания водохранилищ с полным объёмом от 0,1 км<sup>3</sup> и выше в XX веке - количество по периодам и объём в км<sup>3</sup> [Авакян, Лебедева, 2002]

Материк	До 1900	1901-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	Итого
Северная Америка	25 8,4	342 344,4	178 254,4	216 543	113 339	34 176,9	23 24,1	931 1681,5
Южная Америка	1 0,3	22 8,8	30 28,8	54 96,9	88 251,5	51 349,1	34 159,8	280 895,2
Европа	9 3,3	104 121,7	113 175	172 189,4	94 103,6	76 49,3	35 14,3	603 656,6
Азия	5 1,7	47 17,9	161 293,6	215 640	222 484,1	138 321,5	149 226,3	937 1985,1
Африка	-	15 15	21 381,1	24 364,4	57 173,7	52 56,6	15 25,2	185 1016,1
Австралия и Н.Зеландия	—	10 10,6	21 20,1	18 15,5	27 42,4	12 5,9	2 0,45	90 95
Мир	41 13,8	540 518,7	524 1153	699 1840,2	601 1394,3	363 959,3	258 450,2	3026 6329,5

Примечание: верхний ряд - число водохранилищ, нижний - объёмы.

Таблица 1.4.

Крупнейшие водохранилища мира [Авакян, Лебедева, 2002]

Материк	Страна	Водохранилище	Полный объём, км <sup>3</sup>
Африка	Уганда	Виктория	204,8
Азия	Россия	Братское	169,3
Африка	Египет	Насер (Асуан)	160,0
Африка	Зимбабве/Замбия	Кариба	160,3
Африка	Гана	Вольта	148,0
Северная Америка	Канада	Даниэль Джонсон	141,2
Южная Америка	Венесуэла	Гури	138,0
Азия	Ирак	Таргар	85,0
Азия	Россия	Красноярское	73,3
Северная Америка	Канада	Гордон Хрум	70,1
<b>Итого</b>			1350,6

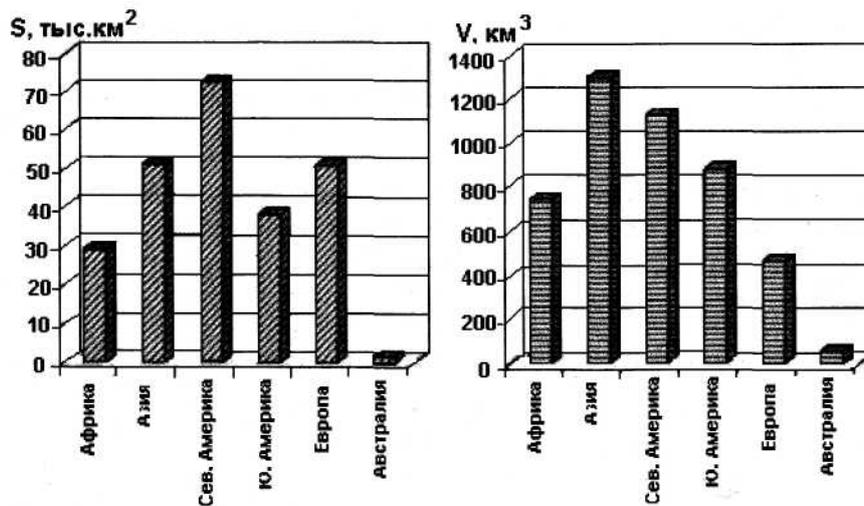


Рис. 1.11. Суммарные величины площадей и объёмов водохранилищ по материкам [Барабанова, 2004]

для проектов всех гидротехнических сооружений проводились расчёты затрат, окупаемости, соотношения спроса на воду и её предложения в конкретных регионах на среднесрочный период и т.п., в долгосрочном аспекте развитие водного хозяйства было стихийным, в том числе и в плановой экономике. Такой путь развития дал огромные выгоды миллиардам людей, но, вместе с тем, привел к непредвиденным чрезвычайно высоким социальным, экономическим и экологическим издержкам, поставил перед нынешним и особенно будущими поколениями гораздо более трудные задачи, чем приходилось решать в предшествовавшие эпохи.

Если раньше основным фактором, определявшим мировую структуру торговли зерном, была нехватка земли, то теперь существенное влияние на неё оказывает и нехватка воды во многих районах земного шара, особенно в Северной Африке, Сахеле, на Ближнем Востоке и в Восточной Африке. Например, количество зерна и других продуктов питания, ввозимых в страны Северной Африки и Ближнего Востока, по водоёмкости производства эквивалентно годовому стоку реки Нил. Для удовлетворения нынешних потребностей стран этого региона при достигнутом ими технологическом уровне производства продовольствия нужен еще один Нил (виртуальный, в силу невозможности устроить второй реальный).

В условиях, когда вода оказывается ограниченным ресурсом, возникает конкуренция за этот ресурс между потребителями. Основные стороны таких конкурентных отношений - промышленность и сельское хозяйство. Если для производства 1 т пшеницы требуется 1000 м<sup>3</sup> воды, то использование такого же количества воды в промышленном секторе может обеспечить выпуск продукции в 50-70 раз большей стоимости. Кроме того, использование 1000 м<sup>3</sup> воды в промышленности обеспечивает создание большего количества рабочих мест, чем в сельском хозяйстве. По узкоэкономическим критериям, когда не учитываются внешние эффекты и издержки (так называемые экстерналии), связанные прежде всего с

экологическими, социальными, а также долгосрочными экономическими факторами, для отражения которых непригодны обычные стоимостные измерители, использование воды в промышленности оказывается более предпочтительным, чем в сельском хозяйстве [Состояние..., 2000]. Это указывает на несовершенство методов экономических сопоставлений, основанных на применении только текущих рыночных цен. Однако это свидетельствует и о том, что некоторые страны, страдающие от дефицита воды, могут использовать её более выгодно, увеличив долю промышленного водопотребления за счет уменьшения сельскохозяйственного.



Рис. 1.12. Распределение суммарного полного объёма водохранилищ более  $0,1 \text{ км}^3$  по материкам [Авакян, Лебедева, 2002]

#### Современные

оценки показывают, что стоимость дальнейшего развития водохозяйственной инфраструктуры «как обычно» для водоснабжения, канализации, водоочистки, сельского хозяйства и охраны окружающей среды потребует ежегодных затрат 180 млрд долларов до 2025 г. При этом в оценку не включены затраты на крупномасштабные переброски стока. Эта оценка сделана на основе будущих потребностей в воде стран, достигших современного уровня индустриализации с централизованным водоснабжением и очисткой загрязненных вод. В случае применения в водном хозяйстве интенсивных технологий эти затраты можно снизить до 10-25 млрд долларов в год для последующих 20 лет [Gleick., 2003].

Если сейчас человек неудовлетворён «неравномерностью» распределения водных ресурсов, то у него имеются две чистые стратегии для исправления ситуации: экстенсивная, сводящаяся к увеличению объёма вовлекаемых в хозяйство водных ресурсов посредством перераспределения стока, и интенсивная, основанная на повышении эффективности использования водных ресурсов.

Интенсивная стратегия предполагает, прежде всего, уменьшение

потребности в воде в расчёте на душу населения (или единицу производимого продукта), причём не посредством сокращения личного потребления ниже санитарных норм, а за счёт технологических и экономических мер в водопользовании, водосбережения и охраны вод. При реализации

экономические

мер по повышению эффективности водопользования не увеличивается показатель объёма воды в расчёте на душу населения, но изменяется критерий дефицитности воды: количество воды, ранее не удовлетворявшее экономическую потребность в ней, становится достаточным при том же объёме производства продукции и численности населения. Кроме того, при интенсивной стратегии можно (и должно) повышать и водообеспеченность территории (в широком понимании) посредством водоохраных мероприятий - вследствие улучшения качества воды в источниках.

Продолжающийся рост населения во многих развивающихся странах (в том числе вододефицитных), их стремление повысить уровень благосостояния и развить экономику, ориентируясь на способы, использовавшиеся развитыми странами для достижения таких целей в прошлом, приводят к росту дефицита пресной воды (соответствующая схема была приведена на рис. 1.8).

Могут ли развивающиеся страны собственными силами преодолеть такую инерцию, реализовать стратегии экономического роста, не приводящие к обострению дефицита водных ресурсов? Это было бы возможно при росте национальной экономики, а последний нереализуем без опоры на рыночные механизмы. Следовательно, ответ в значительной мере зависит от вопроса, в состоянии ли рынок решить проблему вододефицита в развивающихся странах? Для анализа необходимо указать особенности водных ресурсов как источника сырья и воды как товара.

1. Ресурсы воды воспроизводимы, но их воспроизводимость относительна. Как отмечалось выше, тенденция к утрате водными ресурсами свойства воспроизводимости тесно связана с общим экологическим неблагополучием на планете и его непрерывным усилением. Дефицит пресной воды будет нарастать, если процесс экологической деградации не будет остановлен. Отсюда следует вывод: необходимым условием решения проблемы дефицита пресной воды является нормализация антропогенного воздействия на окружающую среду.

2. В случае водопользования действует закон убывающей эффективности. Экономическое процветание развитых стран в значительной степени обусловлено использованием противоположного феномена - эффекта масштаба, когда с ростом объёмов производства увеличивается отдача каждой следующей единицы затрат. Причины, формирующие возможность эффекта масштаба, действуют в обрабатывающей промышленности, особенно в массовом производстве. Что же касается водопользования, то здесь подобные причины, даже если и действуют, перекрываются совсем иными факторами. При расширении эксплуатации водных ресурсов неизбежно проявляется тенденция перехода от более эффективных источников к менее эффективным, так что каждая следующая единица поступающих водных ресурсов обходится все дороже в связи с исчерпанием возможностей наименее затратных источников. Рынок «не любит» ситуаций убывающей эффективности. Отмеченный выше стереотип мышления не возник сам собой, он сформирован рынком. Как известно, горизонт анализа, обеспечиваемого использованием рыночных оценок, относительно недалек. Здесь и образуется ловушка. Возникает контур положительной обратной связи. Дефицит стимулирует рост забора

свежей воды. Это влечет рост издержек для каждой следующей единицы. Появляется причина повышения цены. Поскольку потребление воды при относительно малых объемах малоэластично, потребитель соглашается с новой ценой. В этих условиях происходит дальнейшее увеличение забора воды, гидрологические и экологические условия продолжают ухудшаться, воды становится меньше, её качество падает, издержки растут и т.д. - петля положительной обратной связи затягивается. Получается, что рынок не в состоянии преодолеть кризисную ситуацию, наоборот, он лишь обостряет её.

3. Объем потребления пресной воды колоссален, как отмечалось выше, он не сопоставим ни с одним другим природным ресурсом или техногенным продуктом, использование или производство которого сопряжено с какими-либо затратами.

4. Вода - весьма транспортноёмкий продукт. При современных ценовых соотношениях экономически оправданы перемещения воды лишь в локальных системах водоснабжения. Плечо оправданной транспортировки воды невелико, экономия воды обходится дешевле, чем доставка её дополнительного количества.

5. Пресная вода - общераспространённый природный ресурс. Даже в наименее обеспеченных пресной водой регионах, как правило, имеются поверхностные водные источники или/и месторождения подземных вод. В любом регионе потребность в пресной воде в весьма скромных размерах может быть удовлетворена за счет местных источников (хотя бы собираемой конденсированной атмосферной влаги - для самых обезвоженных местностей). Дефицит воды относителен. Всегда имеется альтернатива расширению водопользования, приспособление хозяйства путем перестройки его структуры и совершенствования технологий к имеющимся возможностям водообеспечения.

Рыночные стимулы толкают к решениям, дающим краткосрочные и, в лучшем случае, среднесрочные результаты, способы достижения которых (в современных условиях антиэкологичные) лишь обостряют проблему в долгосрочном аспекте. Водопользование, развивающееся экстенсивным способом в условиях существенной ограниченности водных ресурсов, неизбежно приводит к кризису, и рынок не препятствует этому. Сил рынка недостаточно для обеспечения устойчивости водопользования при возникновении дефицита воды.

Сценарии развития водного стресса и водного кризиса предполагают нарастание негативных явлений с вовлечением в зону их воздействия большей части населения мира. Важнейшее обстоятельство, которое заставляет говорить о недостаточности рынка как регулятора водопользования в глобальном масштабе, - отсутствие у вододефицитных развивающихся стран необходимых средств. Этот вывод справедлив не только для экстенсивных сценариев (приобретение дополнительного количества воды), но и для интенсивных (закупка водоемких продуктов, инвестирование в водосберегающие технологии) при тех ценах, которые неотвратимо сложатся на нерегулируемом «свободном» рынке. Тем не менее отмеченные выше особенности воды как товара показывают, что решение проблемы вододефицита возможно только при развитии интенсивных форм водопользования, поскольку водопользование, развивающееся экстенсивным способом, рано или поздно приводит к кризису. Следовательно, необходимы технологии, позволяю-

щие максимально эффективно расходовать воду во всех областях её применения - в промышленности, сельском хозяйстве, жилищно-коммунальном секторе.

### 1.6. Водоёмкость производства и эффективность водопользования

Потребление пресной воды, как уже отмечалось, по физическим характеристикам (объём, масса) колоссально, несопоставимо ни с одним другим природным ресурсом или техногенным продуктом. При этом разброс показателей расхода воды на единицу выпуска любого продукта весьма значителен, максимум может быть выше минимума многократно. Например, средние затраты воды на производство \$1 сельскохозяйственной продукции в странах Центральной Азии на порядок выше, чем в лучших хозяйствах пустынной Аризоны (США) или маловодного Израиля. Разница не столь велика, если сравнивать средние показатели одних стран со средними же, а не лучшими других стран, но и в этом случае разброс впечатляет - сопоставление данных для Израиля и стран Центральной Азии о потреблении воды в целом по экономике и в целях орошения приведено на рис. 1.13.

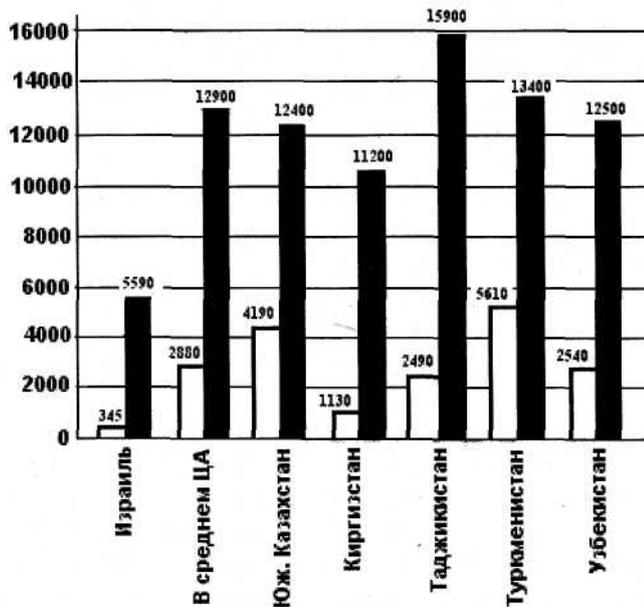


Рис. 1.13. Удельное водопотребление в странах Центральной Азии и Израиле [Баратов, 2004]

Водоёмкость производства продуктов определяется применяемыми технологиями, а также качеством труда и менеджмента. На первый взгляд, парадоксально, что водосберегающие технологии одновременно оказываются и энергосберегающими, экономными практически по любому используемому ресурсу. Мы привыкли к идее заменяемости ресурсов - больше капитала, значит, меньше труда, и наоборот. Однако больше воды - значит, больше энергии для её «проведения» по

всей технологической цепочке, больше материалов для труб, котлов, цистерн, прудов-накопителей, больше текущих расходов на содержание и обслуживание этих компонентов технологии и т.д. Имеются и относительно маловодоемкие отрасли и предприятия, прежде всего, - производство информации, интеллектуальных продуктов, многих видов высокотехнологичного оборудования. При этом следует различать прямую водоемкость, выражающую непосредственные затраты воды на производство единицы продукта, и полную водоемкость, учитывающую расход воды во всех звеньях технологических цепочек, приводящих к данному продукту. Даже в сельском хозяйстве известны маловодоемкие культуры - они возделываются в богарном земледелии.

Таким образом, как бы ни был велик объем пресной воды, используемой в современной экономике, эта величина - регулируемая. Водоемкость ВВП и обобщающие показатели эффективности водопользования зависят, прежде всего, от структуры народного хозяйства (доли водоёмких отраслей) и его технологического уровня. Вода в случае дефицита в значительной мере заменима другими ресурсами и, особенно, водоёмкими продуктами, произведенными в регионах, не страдающих от её дефицита. Имеется в виду замещение в рамках экономики в целом, а не в отдельных отраслях, где его может и не быть. Нельзя заменить воду чем-то другим для водного транспорта, но существуют гораздо менее водоемкие другие виды транспорта; нельзя производить многие продукты растениеводства без значительных затрат воды, но можно отказаться от их производства в пользу импорта, окупая затраты продукцией, производимой в сравнительно маловодоемких отраслях. Для принятия решений такого рода, связанных со структурными сдвигами в национальном хозяйстве, важно, что возникающие в результате эффекты в основном относятся к экстерналиям, поскольку имеют долгосрочный характер.

Повышение цены на ресурс - стимул его экономии и роста эффективности использования. Действенность этого стимула существенно определяется эластичностью потребления от цены. Рынок слабо стимулирует эти процессы, если повышение цены еще не состоялось, а только прогнозируется. Ожидания действуют тем сильнее, чем меньше лаг между принятием решения и его реализацией. Именно поэтому ожидания сильнее всего стимулируют операции спекулятивного характера - инвестиции в водосбережение и охрану вод к этому типу не относятся. Тем более рынок оказывается недостаточным регулятором, когда дело касается изменения структуры народного хозяйства, - это обусловлено отмеченным выше формированием контуров с положительной обратной связью.

Если возникает необходимость использования «неместного» источника (в случае истощения местного источника или его недостаточности для удовлетворения расширяющихся потребностей), вода оказывается весьма транспортноемким продуктом, естественно, не в единицах руб./т или руб./м<sup>3</sup>, а в сопоставлении с объемом её использования. Подходящим измерителем мог бы быть показатель роста доли издержек на водообеспечение в составе затрат на производство единицы продукции при удлинении «плеча доставки» потребляемой воды. Для расчёта такого показателя необходимы данные об издержках на прирост водообеспечения. К

сожалению, с удовлетворительной точностью такие данные вряд ли могут быть получены косвенными методами (экстраполяцией, моделированием, по аналогии и пр.) из-за исключительного разнообразия конкретных условий. Поэтому требуется прямое проектирование, а оно сопряжено с большими затратами и риском некупаемости.

Чтобы пояснить масштабы возможных затрат на доставку дополнительного количества воды, рассмотрим в качестве примера широко известный проект перераспределения стока р. Оби в Аральский регион. Согласно ТЭО, проходившему в 1982 г. Государственную экспертизу Госплана СССР, предусматривались: объём перебрасываемой воды  $27,5 \text{ км}^3$  в год, протяженность основного канала - 2550 км, ширина - до 200 м, глубина - 16 м. Можно прикинуть, во что обошлось бы строительство в наши дни. Согласно ТЭО, в ценах 1982 г. затраты составляли (млрд руб.): 13,8 - главный канал, 11,6 - оросительные системы, 7,2 - новые сельскохозяйственные предприятия, всего - 32,6 млрд руб. (эти данные приведены, в частности, в книге [Лужков, 2008]). Ограничимся главным каналом, затраты на сооружение которого в твёрдой валюте (по курсу 1982 г.) оценивались, следовательно, в 23 млрд долл. Эту величину в соответствии с заключением экспертной подкомиссии Госплана СССР от 20 сентября 1982 г. надо удвоить (в п. 111.23 сказано, что поскольку в представленном на экспертизу проекте «по пусковому комплексу не учтены замечания экспертизы по ТЭО 1-й очереди переброски, определённую расчётную стоимость следует считать заниженной примерно в 2 раза»), получаем 46 млрд долл. Экономисты очень затрудняются с оценкой коэффициента инфляции доллара за прошедшие более четверти века (о советских рублях и говорить нечего, поэтому и пришлось воспользоваться долларovým измерением), самое малое из применяемых значений дефлятора - 3,8 (при расчётах всегда будем выбирать наиболее «щадящее» значение), получаем  $46 \times 3,8 = 174,8$  млрд долл. Это ещё не всё: строительные работы, особенно на линейных сооружениях, и тяжёлая строительная техника, используемая в каналостроении, дорожали с темпом, существенно превышающим темп инфляции, минимальная поправка на 2008 г. - коэффициент 1,5; кроме того, таким же коэффициентом (по минимуму) оценивается удорожание подобных работ, обусловленное ужесточением экологических требований. Окончательно получаем:  $174,8 \times 1,5 \times 1,5 = 393$  млрд долл. Отметим, что за такие деньги можно освоить примерно 20 крупных нефтегазовых месторождений на шельфе наших полярных и восточных морей (пока может считаться освоенным только одно). Огромны и эксплуатационные затраты: только на 10 насосных станций для перекачки воды требуется 10,2 млрд кВт-час в год электроэнергии, для этих целей предполагалось даже построить специальную АЭС.

Эти расчёты произведены по международным рецептам, российскую специфику они не учитывают. Соответствующие коэффициенты для российских условий не оценивались. Однако представление о нашей специфике можно получить косвенно, по аналогии с другими проектами. 15-17 лет назад, когда строилась МКАД, затраты на 1 км этой дороги оценивались в 1 млн долл. Сейчас в Москве проектируется 4-е автомобильное кольцо, дорога такого же класса, что и МКАД. В мае 2008 г. в СМИ промелькнули сообщения, что затраты только на производ-

ство строительных работ (без издержек, связанных с выкупом земли, обеспечением жильём тех, чьи дома подлежат сносу в связи со строительством дороги, и т.п.) в расчёте на 1 км составят на 4-м кольце... 800 млн долл. Комментарии излишни.

Транспортная емкость воды для каждого региона имеет четко выраженный перелом: она относительно невысока, пока объём не превышает местных ресурсов, и очень резко возрастает, как только возникает необходимость привлечения неместных источников. В этом переломе зависимости транспортных затрат от объёма, по существу, проявляется специфика действия закона падающей эффективности для водных ресурсов (в случае достаточно широко распространенных ресурсов - уголь, нефть, железная руда, бокситы и пр. - резкого перелома не наблюдается).

При современных ценовых соотношениях экономически оправданы перемещения воды лишь в локальных и, иногда, региональных системах водоснабжения, водоводах протяженностью не более трёх-четырёх сотен километров и оросительных системах из источников, удаленных от потребителя не более чем на такое же расстояние. Экономическое обоснование более дальних перемещений воды представляет проблему, которую не удастся решить без того, чтобы при этом не было резких возражений по поводу корректности произведенных калькуляций. Конечно, эти оценки не распространяются на перевозки бутилированной питьевой воды - здесь определяющее влияние на розничную цену товара имеют тара, разлив, сертификация, контроль качества, издержки торговли и пр.; воды в этом товаре много меньше, чем всего остального (наличие фальсификаций - на российском рынке они, по-видимому, доминируют - этого тезиса не отменяет).

Таким образом, за отмеченным исключением плечо оправданной транспортировки воды невелико, если обоснование проводится на основе текущих значений стоимостных оценок. Однако из приведенных выше соображений о ненадежности таких оценок в долгосрочном анализе неизбежно вытекает вопрос: изменится ли этот вывод, если попытаться принять во внимание вероятные изменения оценок? Для этого надо выявить тенденции структурных сдвигов в системе стоимостных оценок, определяемых рынком. Особых подробностей для наших целей не требуется, так что достаточно констатировать общеизвестную истину: цены на высокотехнологичное оборудование снижаются (именно оно необходимо для ресурсосбережения, в том числе для повышения эффективности использования воды), а на строительные работы и «тяжелую» технику (то, что прежде всего требуется для «каналостроения») - растут. Эта тенденция - долгосрочная. Следовательно, ситуация будет меняться отнюдь не в пользу грандиозных проектов «переброски».

Итак, с учётом современного технического уровня производства, его структуры и цен, а также ожидаемой динамики этих факторов экономия воды дешевле, чем обеспечение её дополнительного количества. Естественно, это справедливо не всегда, а лишь до определённого предела эффективности водопотребления, но в настоящее время такой предел еще весьма далек для большинства звеньев мирового хозяйства. Тенденции развития мировой экономики лишь усиливают отмеченное различие в затратах.

В мировой практике встречаются особые случаи широкомасштабных перебросок, целесообразность которых определяется их исключительной спецификой.

Один из них - канадская гидроэнергетическая система, в которой осуществляется переброска до  $200 \text{ км}^3$  воды в год, однако между близко расположенными реками. Целью при этом является увеличение их общей энергетической мощности и обеспечение более однородного распределения гидроэнергетического потенциала между ГЭС. При этом экологические последствия оказываются минимальными, поскольку районы-доноры и районы-реципиенты в экологическом отношении весьма близки (чего никак нельзя сказать, например, о среднем или нижнем течении Оби и Приаралье), а обводненность соответствующих территорий практически не изменяется. Другой случай - переброска части стока реки Янцзы на север Китая, в бассейн реки Хуанхэ. В 1990-е гг. в Китае обсуждался грандиозный проект строительства трех каналов в этом направлении, по масштабам вполне подходящий под рубрику «великие стройки коммунизма». Анализ показал, что по затратам, эффективности, экологическим последствиям и иным параметрам проект неприемлем. Вместо него было решено реализовать гораздо более скромный план - реконструировать древний «Великий канал» (ровесник Великой китайской стены) и построить один новый, из водохранилища «Три ущелья» на Янцзы (сооружается, прежде всего, для целей гидроэнергетики, независимо от канала). Этот новый канал длиной 1100 км рассчитан на забор  $12 \text{ км}^3$  воды. Предполагается, что он будет обеспечивать нужды коммунального хозяйства (населения) и промышленности (где это население занято) в бурно растущих городах, а использование воды для орошения не предусмотрено вовсе. При эксплуатации канала не требуется энергия на перекачку, так как из водохранилища через пробитый в скалах туннель вода поступает в открытое русло и дальше идет самотеком. По сути в бассейне Хуанхэ сложилась такая демографическая и социальная ситуация, когда альтернативы каналу нет, и в этих условиях было решено строить его в минимально необходимом варианте. Совсем иная ситуация в Центральной Азии, где в первую очередь требуется не дополнительная вода, а рационализация использования имеющейся.

### **1.7. Дефицит пресной воды - глобальная проблема**

Водный дефицит в одном регионе ставит проблемы для соседних регионов, оказывается для них внешним фактором, от которого зависит их собственная устойчивость. С этим связано еще одно обстоятельство, приводящее к глобальной постановке проблемы дефицита пресной воды. Речь идет об отмеченной выше очевидной неспособности наиболее отсталых из вододефицитных развивающихся стран самостоятельно, собственными силами справиться с нехваткой водных ресурсов (см., например, [Африка., 2002]). С одной стороны, в таких странах (имея в виду и государство, и структуры национального бизнеса, и население вместе взятые) просто не будет средств на приобретение минимально необходимого количества воды при тех ценах, которые сложились бы на «свободном» рынке. Естественно, надо принимать во внимание цены не только на воду, но и на продукты, которые производятся на экспорт в таких странах и обеспечивают им валютные поступления. Под «свободным» рынком в данном случае имеется в виду такой, где

нет дотаций, субвенций и пр., каждый платит за себя в пределах своих бюджетных ограничений и выполнены основные предположения «совершенной» конкуренции. Специально интересоваться конкурентными факторами для обоснования сформулированного тезиса нет необходимости, так как монополия покупателя воды применительно к медленно модернизирующимся развивающимся странам невозможна, а монополия продавца еще более усугубила бы их проблемы.

Инерция движения развивающихся стран такова, что «задел» для дальнейшего обострения дефицита воды во многих из них сформирован на два-три десятилетия. Здесь взаимно усиливают друг друга звенья контура, схематически представленного на рис. 1.8. Истощение водных ресурсов, ухудшение качества воды и рост её дефицита мало влияют на рост населения, но крайне негативно сказываются на экономическом росте и благосостоянии. В итоге возможности решения проблемы водного дефицита уменьшаются, а рост населения продолжается, желание повысить уровень жизни усиливается, в том числе и под влиянием все большей информированности о благосостоянии в развитых странах. Рыночные стимулы толкают к решениям, дающим краткосрочные и, в лучшем случае, среднесрочные результаты, способы достижения которых, неизбежно антиэкологичные, лишь обостряют проблему в долгосрочном аспекте. Эту антиэкологичность некоторые экономисты полагают временным явлением, имеющим место лишь пока экологические факторы в существенной мере остаются экстерналиями; однако полностью интернализировать их не удастся - по определению - никогда, ибо они имеют иную природу в сравнении с обычными рыночными факторами, которые представляют собой продукты функционирования экономической системы, а не определяются вне её.

Недостаток пресной воды и бедность тесно коррелируют, водный дефицит нарастает вместе с нищетой и голодом, а следовательно, вносит вклад в возникновение и усиление угроз локальных войн (со всеми вероятными осложнениями в более широких масштабах) и терроризма (в том числе и глобального). Не менее серьёзной может быть угроза, обусловленная антисанитарией, неизбежно сопровождающей острый дефицит воды в коммунальном хозяйстве - она становится причиной возникновения очагов инфекционных болезней и порождаемых ими эпидемий. Помогая развивающимся странам решить проблему обеспеченности пресной водой, развитые государства будут охранять себя от этих угроз, и превентивные меры, как всегда, в конечном счёте обойдутся гораздо дешевле, чем борьба с последствиями. Помощь - нерыночная форма взаимодействия, хотя методы её реализации не исключают рыночных элементов, а среди результатов могут быть и рыночные эффекты.

Решение проблемы водного дефицита через развитие интенсивных форм водопользования требует технологий, позволяющих максимально эффективно расходовать воду во всех областях её применения. Эти технологии базируются на автоматизации производственных процессов и управления ими, средствах регулирования, использовании контрольно-измерительной аппаратуры и разнообразных химических продуктов (сорбентов, коагулянтов, флокулянтов и пр. - для водоочистки и водоподготовки, полимерных материалов - для систем подземного

капельного орошения и т.д.), применении биологических методов, кроме того, необходим технологически и экономически грамотный менеджмент.

Удовлетворить потребность в таких технологиях за счет собственного производства развивающиеся страны в предвидимом будущем не смогут (за исключением Китая и, возможно, ещё нескольких стран, да и им не всегда выгодно отказываться от импорта). Очевидно, что помощь со стороны развитых государств медленно модернизирующимся вододефицитным развивающимся странам будет оказываться не поставками воды. Она будет оказываться в виде водосберегающих, очистных и прочих технологий, ориентированных на повышение эффективности использования той воды, которая имеется у этих стран, и обеспечивающих сохранность источников водоснабжения, воспроизводство пресной воды в естественных экосистемах. Она будет предоставляться также в виде поставок водоёмкой продукции различных отраслей, что позволит сократить собственные водоёмкие производства (или не развивать их). Это полностью соответствует важнейшему направлению технического развития - везде, где возможно, замещать вещество информацией, соответственно, перевозку вещества - передачей информации, сокращать удельные затраты ресурсов на производство и повышать эффективность использования ресурсов [Данилов-Данильян, 2001].

Только для питьевых целей вода, как отмечалось выше, будет достаточно широко транспортироваться на дальние расстояния, причем в возрастающих объёмах. Однако и здесь надежды тех, кто предполагает возить особо качественную воду из чистых природных источников в больших количествах за тридевять земель, не оправдаются: бутилированную питьевую воду нормативного качества проще и гораздо дешевле производить на месте, используя современные средства водоподготовки, которые дают хорошие результаты даже для вод, квалифицируемых как умеренно загрязненные.

Рассуждая о возможных перспективах становления международного рынка воды (а пока такого рынка нет\* не считая все того же исключения бутилированной воды), обычно сравнивают его с нынешним рынком нефти. На наш взгляд, это модное сравнение неправомерно. Не только реальные, но и прогнозируемые масштабы возможного водопотребления показывают, что в предвидимом будущем цена воды, используемой для промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых нужд, за исключением питьевого водоснабжения, останется далекой от цены нефти. Когда указывают, что литр бутилированной питьевой воды стоит уже почти столько же, сколько литр бензина, пренебрегают тем, что бензин, с одной стороны, не продается в бутылках (для стандартного потребления), а с другой - не потребляется кубокилометрами. Подобный уровень цен несовместим с объёмами потребления воды в промышленности, к примеру, в теплоэлектроэнергетике или производстве полимеров. В этих рассуждениях игнорируется качественная разница между целями использования воды - социальными, когда имеют в виду хозяйственно-питьевое водоснабжение, и производственно-экономическими, когда её потребляют промышленность и сельское хозяйство. Отмеченная ранее высокая транспортная емкость воды, естественно, имеет не некий абсолютный, а относительный характер в ценовых измерителях. Транспортные та-

рифы демонстрируют устойчивую тенденцию роста в силу объективных и весьма долговременных экономических причин, поэтому высокую транспортную емкость воды можно считать непреходящим фактором.

Важнейшее отличие рынка воды от рынка нефти определяется колоссальной разницей в физических объемах их потребления. К примеру, в России вряд ли когда-нибудь добыча нефти существенно превысит 500 млн т (при том, что весьма значительная часть этого сырья экспортируется). Воду Россия не продает, а для внутренних целей наше хозяйство в ближайшие 20-25 лет нуждается не менее чем в 50 км<sup>3</sup> воды в год (возможен рост до 100 км<sup>3</sup>) даже с учетом самых радикальных мер по водосбережению - это в 100 раз больше, чем добыча нефти для внутренних нужд и экспорта. Уже из этого видно, что соотношение между внутренним потреблением и экспортом для воды не может быть даже близким к тому, какое имеется для нефти.

Международный рынок воды не заменит рынок нефти и не будет подобен ему, он не станет значимым сектором мирового рынка. Тем более важным окажется сектор водосберегающих, водоэффективных и водоохраных технологий - уже потому, что, в отличие от рынка воды, он выгоден для тех, кто делает погоду на мировом рынке. Для понимания перспектив рынка воды надо рассматривать не современный рынок нефти, а тенденции развития этого рынка, перспективы энергетического рынка в целом. На этом рынке энергоносители все больше замещаются, во-первых, энергосберегающим оборудованием и, во-вторых, оборудованием для использования возобновляемых источников энергии, прежде всего, ветровой и солнечной (именно ветряки в последнее десятилетие - самый быстрорастущий сектор на рынке технологий). Беспрецедентная скорость роста нефтяного рынка в первые три четверти XX века стала возможной только благодаря тем особенностям нефти, которыми вода отнюдь не обладает. В случае с водой история рынка нефти не повторится, надежды на такое повторение похожи на попытки, предпринимавшиеся в середине XIX века, изобрести летательный аппарат с машущими крыльями (предполагалось назвать его махолетом), приводимыми в действие паровым двигателем, как у паровоза или парохода.

Ориентация на продажу воды в огромных количествах, многими кубокилометрами в год, поставляемыми по каналам тысячекилометровых протяженностей, повлечет тяжёлые последствия для тех стран, которые попытаются пойти по такому пути. Они станут сырьевыми придатками других государств, причем отнюдь не богатых, не технологически передовых. Ситуация, которую в случае нефти и иного традиционного сырья для его не слишком развитых и при этом достаточно многочисленных производителей можно считать ловушкой с драматическими последствиями, в случае воды может быть воспроизведена как трагифарс. Поставщик этих кубокилометров будет ревниво следить за развитием технологий интенсивного водопользования, поскольку довольно быстро поймёт, что они угрожают его бизнесу: каждый позитивный шаг таких технологий создаёт стимулы для отказа от покупок его товара. И, конечно же, конкуренты - не те, которые продают такую же воду, а те, кто продает технологии, - постараются сделать торговлю водой занятием предельно неустойчивым, максимально зависящим

от их товаров - для продавца воды это внешний фактор, а для производителя технологий - контролируемый.

Межбассейновые переброски требуют гигантских затрат неквалифицированного труда, использования огромного количества техники, которую никак нельзя считать технически передовой. Конечно, современные экскаваторы - уже не те, что использовались при строительстве, например, канала Волга-Дон, но дело в том, что научно-технический прогресс определяется вовсе не экскаваторами. И чем больше страна использует экскаваторов, тем меньше остается у неё возможностей для научно-технического развития, для вложений в человеческий капитал, для того, чтобы занять достойное место в системе международного разделения труда.

Отметим важнейшее отличие перехода к интенсивному водопользованию от расширения количества используемой воды посредством «каналостроительного» перераспределения речного стока. Оно состоит в возможности быстрого получения эффекта в малых или средних масштабах и, соответственно, такого управления процессом перехода, при котором экономические результаты, полученные на ранних стадиях, используются для финансирования последующих. Подземное капельное орошение не обязательно внедрять сразу на всех орошаемых площадях, обратное водоснабжение - на всех предприятиях, а средства водосбережения в жилищно-коммунальном секторе - во всех городах, поселках, районах и домах. Инвестиционные средства всегда ограничены, и масштаб внедрения новых технологий на каждом этапе, естественно, следует выбирать соответственно наличию этих средств. Экстенсивный путь таких возможностей выбора не даёт: чтобы получить первый результат, канал надо довести хотя бы до первого потребителя воды, и средства, необходимые для этого, как бы неделимы - «полканала» не принесут эффекта, хотя бы сопоставимого с затратами. И, в отличие от технологий водосбережения, минимальный начальный шаг в каналостроении, дающий результат, требует многомиллиардных инвестиций и нескольких пятилеток строительства.

Отмеченная особенность перехода к интенсивному водопользованию не только весьма удобна экономически. Поставщику технологий она дает отличную возможность сформировать зависимость их получателя от поставок (метод, чрезвычайно широко применяемый развитыми странами и транснациональными корпорациями). Первое «впрыскивание» производится за счет поставщика, это не просто рекламно-демонстрационная акция, поскольку приносит и неплохие политические дивиденды: богатая страна «бескорыстно» помогает развивающейся справиться с проблемой дефицита пресной воды, не говоря о том, что главная причина донорства - обеспечение безопасности. А дальше срабатывает демонстрационный эффект, масштаб использования новых технологий начинает расти уже за счет займов и собственных средств, при этом выясняется, что ремонт, запчасти, менеджмент и пр. не воспроизводятся в стране-реципиенте, и все это стоит весьма немалых денег. Два-три шага, и зависимость от поставок становится не просто экономическим, но политическим фактором. Может быть, выбран неправильный путь? Внедрение технологий эффективного использования и сбережения

воды, безусловно, правильное направление, а как строить взаимодействие с поставщиками технологий - это другой вопрос. Было бы лицемерием говорить, что каждая развивающаяся страна, страдающая от дефицита пресной воды, может решить эту проблему, не попадая в сильную зависимость от тех, кто будет поставлять ей необходимые технологии.

### **1.8. Политические последствия дефицита пресной воды**

Проблема дефицита пресной воды становится весьма существенным фактором мировой политики. Обеспечение международной безопасности потребует самого серьезного отношения к ней, а открывающиеся для носителей передовых технологий экономические перспективы, подогреваемые сопутствующими политическими возможностями, обусловят интерес к ней структур бизнеса. Проблемы пресной воды станут сюжетом глобальных политических и экономических игр. Непродуманные решения в такой ситуации - верный путь в ловушку. Но уже сейчас существуют политические проблемы, связанные с использованием воды, которые обусловлены принадлежностью многих водных объектов одновременно разным странам.

Высокие показатели водообеспеченности на душу населения на самом деле не всегда отражают реальную экономическую картину, так как освоение, казалось бы, доступных ресурсов может оказаться экономически нецелесообразным в силу неэффективности или даже практически невозможным в силу каких-либо политических, социальных, экологических и иных причин. Специфическая ситуация возникает с трансграничными водами, когда в бассейне реки или на месторождении подземных вод расположено несколько государств, а также если река протекает по границе между двумя государствами. Страны, расположенные ниже по течению, могут столкнуться с нехваткой воды или даже лишиться её из-за регулирования стока в верхнем течении. Примеров таких рек много. Среди крупных рек мира это, в частности, Нил и Конго в Африке, Колорадо и Ла-Плата - в Америке, Ганг, Амударья, Сырдарья, Амур и Иртыш - в Азии, Дунай и Рейн - в Европе. В мире не менее 261 речных водосборов, занимающих 45,3 % суши (без Антарктиды), являются международными. 71 подобная река находится в Европе, 53 - в Азии, 39 - в Северной и Центральной Америке, 38 - в Южной Америке и 60 - в Африке. 155 из них разделены между двумя, а остальные - между тремя и более странами. Примерно 50 стран имеют не менее 75 % своей территории в пределах международных речных бассейнов. На водосборах международных рек проживает более 40 % населения мира [Helmer, 1997; The World..., 1992].

Проблем с использованием международных вод или трансграничного стока не возникает при избытке других водисточников, но если такие реки служат основными водными ресурсами для стран, расположенных в их бассейне, то экономические противоречия и политические конфликты практически неизбежны. За последние 50 лет зафиксировано 507 споров из-за воды, из них 37 привели к острым конфликтам, в том числе 21 сопровождался военными акциями [Lieb-

schel, 2004]. Такие конфликты имеют длительную историю, так как вода всегда служила инструментом давления при разрешении не только обусловленных водными проблемами, но и иных коллизий. Доступ к воде был источником споров и разногласий, как при попытках гидротехнического строительства, так и при загрязнении вод.

В выгодном положении оказываются страны, расположенные выше по течению рек, так как у них имеются возможности диктовать свои условия в вопросах использования воды тем, кто расположен ниже и, таким образом, зависит от соседа. Например, Израиль получает значительную часть воды с сопредельных территорий (0,5 км в год), Узбекистан - более 65 %, а в Бангладеш почти вся вода поступает с территории Индии, в Египет - из стран выше по течению реки Нил. Хорошо известны конфликты за воду, например, на Ближнем Востоке, между Индией и Бангладеш, а сейчас и странами Нильского бассейна. Возможность вооруженных конфликтов за водные ресурсы в недалеком будущем не представляется невероятной.

За последние 50 лет зафиксировано 1228 совместных инициатив по использованию трансграничных водотоков и международных озер, в том числе подписано 150 соглашений об использовании вод, которые делают международные отношения в области управления водными ресурсами более устойчивыми. Совместно используемые воды могут быть предметом сотрудничества между странами. Еще в 1950-е гг. страны, расположенные в водосборе реки Рейн, создали многостороннюю комиссию для решения различных проблем, в особенности связанных с окружающей средой. Другой пример - совместные усилия США и Канады по очистке Великих озер. В Европе существуют региональные конвенции по охране Северного, Балтийского и Средиземного морей. В 1997 г. ООН рассмотрела проект конвенции о международных водах, в которой содержатся два ключевых принципа их распределения: один - справедливое и разумное использование, и второй - обязательство не причинять значительного ущерба. Против проекта конвенции проголосовали Турция, Китай и Бурунди [Postel, 2003], он был отклонён. Несмотря на то, что заключены многочисленные соглашения по использованию международных вод (двусторонние и многосторонние), еще не решены важнейшие конкретные вопросы: механизмы и стандарты контроля за выполнением соглашений, условия распределения воды с учётом имеющихся ресурсов и потребностей. Что же касается всеобщей конвенции о международных водах, её принятие остаётся делом неопределённого будущего.

## 1.9. Заключение

Вода - важнейший из используемых человеком природных ресурсов, её ресурсы на Земле огромны, однако лишь малая их часть экономически доступна для эксплуатации. Мировое хозяйство потребляет воды по массе больше, чем всех остальных природных ресурсов, вместе взятых, и водопотребление непрерывно растёт. Ценность воды для экономики неадекватно отражается системой рыноч-

---

ных измерителей, поэтому её использование нерационально и неэффективно, и она постепенно утрачивает свойство полной воспроизводимости - ресурсы пресной воды сокращаются. Ожидается, что уже в третьем десятилетии XXI века человечество может столкнуться с проблемой глобального дефицита пресной воды, который станет одним из основных ограничителей экономического роста, причиной усиления нищеты и социальной напряженности, будет определять ключевые аспекты международной политики. Неравномерность распределения ресурсов по территории суши, резкие различия стран мира по водообеспеченности определяют остроту политических и экономических проблем, научно обоснованные рецепты решения которых отсутствуют.

## Глава 2

# ВОДА - СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ РОССИИ

### 2.1. Водные ресурсы России

В России доступные возобновляемые запасы воды составляют 4260 км<sup>3</sup>. На душу населения приходится более 29 тыс. м<sup>3</sup>. Здесь сосредоточено около четверти мировых запасов пресных поверхностных и подземных вод. Россия занимает второе место в мире по валовым ресурсам пресной воды, а по водообеспеченности в расчете на душу населения - третье место среди крупных стран (табл. 2.1). Однако среди этих шести стран в России (и в Индии) наименее благоприятное внутригодовое распределение водных ресурсов (рис. 2.1), требующее создания водохранилищ для обеспечения равномерного поступления воды потребителям.

Таблица 2.1.

Валовые ресурсы воды и водообеспеченность шести ведущих стран мира

Страна	Ресурсы речного стока, км <sup>3</sup> /год	Водообеспеченность, тыс. м <sup>3</sup> /год-чел.
Россия	4348	28,7
Бразилия	8120	<b>42,2</b>
Канада	3420	<b>109</b>
США	3048	<b>10,6</b>
Китай	2700	<b>2,1</b>
Индия	2037	<b>1,7</b>

Основная часть речного стока формируется в пределах территории страны, речные водные ресурсы располагаются по территории более или менее равномерно, уменьшаясь в южных равнинных районах Европейской части, Западной и Восточной Сибири. Величина их на душу населения в субъектах федерации зависит от численности и плотности населения, поэтому она существенно снижается в наиболее населенных районах Северного Кавказа, где составляет порядка 1800 м<sup>3</sup> в год на человека. В этом районе нередко отмечается дефицит воды, особенно в засушливые годы, при этом водные ресурсы используются достаточно интенсивно.

но. Характеристики водообеспеченности регионов России приведены в табл. 2.2, а в табл. 2.3 - данные о наименее и наиболее обеспеченных (в расчете на душу населения) субъектах федерации.

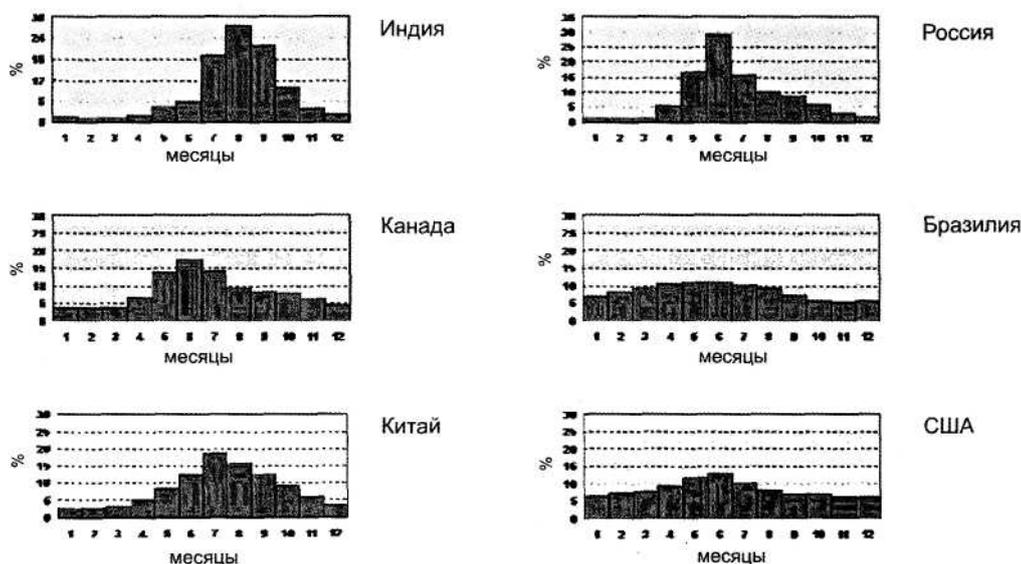


Рис. 2.1. Внутригодное (по месяцам) распределение водных ресурсов шести ведущих стран мира (в %)

Таблица 2.2.

Удельная водообеспеченность экономических районов России (с учетом транзитных вод) [Бобылев, 2005]

Экономические районы	Водообеспеченность (тыс. м <sup>3</sup> /год)	
	на 1 км <sup>2</sup> территории	на душу населения
Северный	349	90,6
Северо-Западный	455	11,6
Центральный	232	3,9
Центрально-Черноземный	125	2,7
Волго-Вятский	577	18,2
Поволжский	503	17,3
Северо-Кавказский	195	4,3
Уральский	157	6,6
Западно-Сибирский	241	44,7
Восточно-Сибирский	273	136
Дальневосточный	290	297
Россия в целом	250	28,5

Таблица 2.3.

**Субъекты Российской Федерации с наиболее низкой и наиболее высокой водообеспеченностью**

Субъект федерации	Водообеспеченность, тыс. м <sup>3</sup> /год-чел.
Московская область	1,36
Белгородская область	1,79
Курская область	3,0
Курганская область	3,45
Орловская область	4,79
Республика Калмыкия	5,38
Воронежская область	5,48
Ростовская область	6,22
Республика Коми	149
Тюменская область	179
Красноярский край	319
Республика Саха (Якутия)	944
Ямало-Ненецкий АО	ИЗО
Эвенкийский АО	15350
Таймырский АО	19891

В России насчитывается 2220 водохранилищ с объемом от 1 млн м и более [Эдельштейн, 1998]. Водозабор из водоисточников составляет около 80 км<sup>3</sup>/год (2007 г.). Эксплуатационные запасы подземных вод составляют 30 км<sup>3</sup>/год, а извлекается из недр около 11 км<sup>3</sup>/год, в основном на хозяйственно-питьевые нужды. В ряде местностей происходит переэксплуатация подземных вод, например в районах Москвы, Брянска, Курска, Санкт-Петербурга с понижением уровня воды на 65-150 м. Забор морской воды составляет несколько более 5 км<sup>3</sup>/год.

Водозабор в России составляет менее 2 % от доступных водных ресурсов. Основная часть извлекаемой воды - 64 % - используется в промышленности. Оставшаяся часть - в сельском хозяйстве и для коммунально-бытовых нужд примерно в равных долях - 17 и 19 %. В период с 1965 до середины 1970-х гг., отмеченный высокими темпами экономического роста, активно росли все хозяйственные воздействия на водные ресурсы, потребление воды увеличилось за эти годы в 2-2,5 раза. С 1975 до конца 1980-х гг. рост экономики замедлился, кроме того, стали внедряться водосберегающие технологии, и воздействие на водные ресурсы практически стабилизировалось. В сравнении с 1970 г. к 1990 г. количество оборотной и последовательно используемой воды увеличилось в три раза. Сократился более чем на 30 % объем воды для орошения, по-видимому, в связи с повышением естественной увлажненности на юге Европейской части России [Зайцева, 2003]. В период 1975-1990 гг. общее водопотребление составляло около 100 км<sup>3</sup>/год. Лишь в конце 1980-х гг. начало несколько снижаться, затем наступило резкое, а с 1995 г. более плавное падение, продолжающееся по сей день, хотя водопотребление в промышленности несколько возросло в 2004-2007 гг.

Особенностью использования водных ресурсов в России (как и в других странах СНГ) является низкая эффективность. При падении промышленного и сельскохозяйственного производства в 1990-х гг. эффективность использования водных ресурсов снижалась в промышленности, где удельное водопотребление на единицу произведенной продукции в денежном выражении (в сопоставимых ценах) выросло в 1,5 раза, и только после 2000 г. наметилось уменьшение удельного водопотребления. В коммунально-бытовой сфере изменения были незначительными. В сельском хозяйстве водопотребление сильно снизилось. Это было связано не с повышением эффективности использования воды, а с сокращением орошаемого земледелия, в ряде регионов - на 60-80 % (Центрально-Черноземный, Дальневосточный, Волго-Вятский), уменьшением поголовья скота на крупных животноводческих фермах и, частично, длительным периодом повышенной влажности на территории России. На Северном Кавказе, основном районе орошаемого земледелия, при падении водопотребления на орошение на 30 % удельное водопотребление выросло на 9 % [Зайцева, 2001].

Централизованным водоснабжением питьевой водой в России охвачено только 2/3 населения. Это в основном жители городов и поселков городского типа. Сельское население получает воду в основном из колодцев или поверхностных источников.

Рост удельного водопотребления отражает тот факт, что в 1990-е гг. относительное сокращение сброса (водоотведение) сточных вод оказалось меньшим, чем относительный спад промышленного производства. Этот факт не представляется неожиданным. Дело в том, что предприятия, оказавшись в трудном экономическом положении, а весьма многие - на грани выживания, в целях экономии финансовых средств практически прекратили техническое перевооружение и модернизацию основных средств и, тем самым, реализацию мер по водосбережению. Жесткая экономия «подкосила» и природоохранные мероприятия, более того, многие действовавшие очистные сооружения постепенно пришли в негодность, не ремонтировались и не обновлялись. Кроме того, экономический спад 1990-х гг. очень слабо повлиял на динамику водопотребления в жилищно-коммунальном секторе: в 1999 г. использование воды на хозяйственно-питьевые нужды составило 91,1 % от уровня 1990 г., в остальные годы за период 1993-2002 гг. этот показатель был не меньше 93,3 % [Думнов, Борисов, 2003].

Водоотведение составило к 2000 г. около 55 км<sup>3</sup>/год, из которых значительную долю - около 40 % - составляют загрязненные и недостаточно очищенные воды. Высокая доля загрязненных сточных вод обусловлена понижением эффективности очистных сооружений в период спада производства. Для России характерны аварийные сбросы загрязненных вод, связанные с авариями на очистных сооружениях, а также нелегальные сбросы сточных вод в обход очистных сооружений в ночное время. Это приводит к тотальному загрязнению поверхностных и многих подземных источников водоснабжения, в результате чего порядка 35 % проб воды в этих источниках не соответствуют стандартам качества (имеются и другие оценки, как выше, так и ниже приведенной). В целом в России без очистки в водные объекты сбрасывается около 20 % неочищенных канализационных вод

(табл. 2.4). Так называемые нормативно-чистые сточные воды и нормативно очищенные сточные воды на самом деле нуждаются в дополнительном разбавлении водами водоприемника для достижения в нем естественного качества воды. Ежегодный ущерб от загрязнения водных объектов в первые годы XXI в. составлял в среднем около 70 млрд руб. (в ценах 2001 г.) [Данилов-Данильян и др., 2004], за последние годы этот показатель возрос.

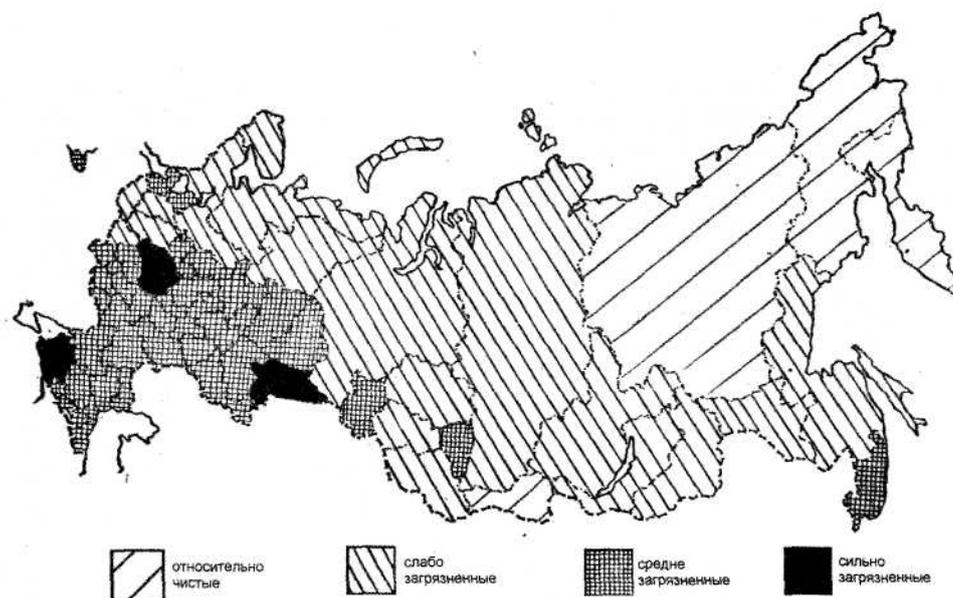
Таблица 2.4.

**Сброс сточных вод в крупных городах России в 2002 г. [Думнов, Борисов, 2003]**

Город	Сброс сточных вод в поверхностные водные объекты				
	всего, млнм <sup>3</sup>	i 13 из них загрязненных сточных вод			
		всего, млн м	в % к общему объему сброса сточных вод города	в том числе без какой- либо очистки, млн м <sup>3</sup>	
			всего, млн м <sup>3</sup>	в % к общему объему загряз- ненных стоков города	
Российская Федерация - всего, в том числе:	54712	19767	36	4058	21
Москва	3326	2661	80	66	2,5
Санкт-Петербург	1263	1183	94	424	36
Нижний Новгород	689	256	37	19	7
Краснодар	650	94	14	4	4
Новосибирск	649	38	6	33	87
Самара	389	279	72	15	5
Красноярск	354	304	86	55	18
Братск	347	241	70	17	7
Владивосток	327	320	98	313	98
Чита	310	33	11	0,0	=0,0
Тюмень	289	56	19	5	9
Челябинск	283	283	99,8	4	1,4
Кемерово	281	170	61	69	41
Пенза	269	113	42	11	10
Дзержинск	263	51	20	3	15
Казань	261	226	87	10	4
Екатеринбург	235	233	99	17	7
Омск	224	223	99,5	18	8
Воронеж	223	159	71	-	-
Новокузнецк	214	214	100,0	103	48
Ярославль	213	213	100,0	79	37

*Примечание.* На долю приведенных в таблице городов приходится треть общего сброса загрязненных стоков России и более четверти загрязненных сточных вод без какой-либо очистки. После 2002 г. ситуация несколько улучшилась только в Санкт-Петербурге и Москве.

На рис. 2.2 приведена карта уровня загрязнения поверхностных вод в России [Коронкевич и др., 2004]. Максимальный уровень загрязнения наблюдается в районах наибольшего промышленного и сельскохозяйственного развития.



**Рис. 2.2. Загрязнение поверхностных вод в России**

Практически все водные объекты водосбора реки Волги подвержены антропогенному воздействию, и качество воды в них не отвечает нормативным требованиям. Большинство загрязняющих веществ относится к первому и второму классам опасности. Для верхнего, среднего и нижнего участков реки Волги среднегодовые концентрации весьма многих загрязнителей превышают предельно допустимые. Состояние подземных вод в бассейне реки часто также не соответствует санитарным нормам, особенно в районах промышленных городов, где предельно допустимые концентрации превышены в десятки, а иногда и в сотни раз. Наиболее значительно загрязнение нефтепродуктами (Брянская, Вологодская, Орловская, Ростовская, Самарская, Свердловская области) и фенолом (Череповец, Редкино, Москва, Саратов, Тольятти). В Калмыкии, Ярославской и Костромской областях отмечено невыполнение нормативов соответственно в 71, 45, и 38 % исследуемых случаев, и в 20-30 % случаев еще в 11 административных единицах. Наихудшее положение сложилось в Вологодской, Владимирской, Тверской, Нижегородской, Саратовской областях и Башкирии. Обследование, проведенное в середине 1990-х годов, показало, что более чем в половине городов России питьевая вода по содержанию индикаторного галоморфного соединения - хлороформа не соответствует гигиеническим требованиям [Эльпинер, 1999].

Низкое качество доставляемой населению питьевой воды обусловлено не только загрязнением ее источников, но и — нередко — отсутствием водоохранных зон вокруг них, отсутствием или низким качеством оборудования на станциях во-

доподготовки, неудовлетворительным состоянием водопроводных сетей. Физический износ последних в настоящее время оценивается в 65-70 % (более 334 тыс. км), в срочной замене (не ремонте!) нуждаются не менее 34 % (176 тыс. км), утечки из систем водоснабжения по официальным данным составляют 3,26 км<sup>3</sup> в год. Отметим, что экспертные данные (на основе специальных обследований) о потерях воды в ЖКХ обычно не менее чем в два раза превышают официальные.

Для водного хозяйства и экономики в целом Европейской части России огромное значение имеет Волжско-Камский каскад водохранилищ. Рис. 2.3 дает представление о масштабах этой системы, которая вносит критически важный вклад в современную российскую гидроэнергетику, гидромелиорацию, водный

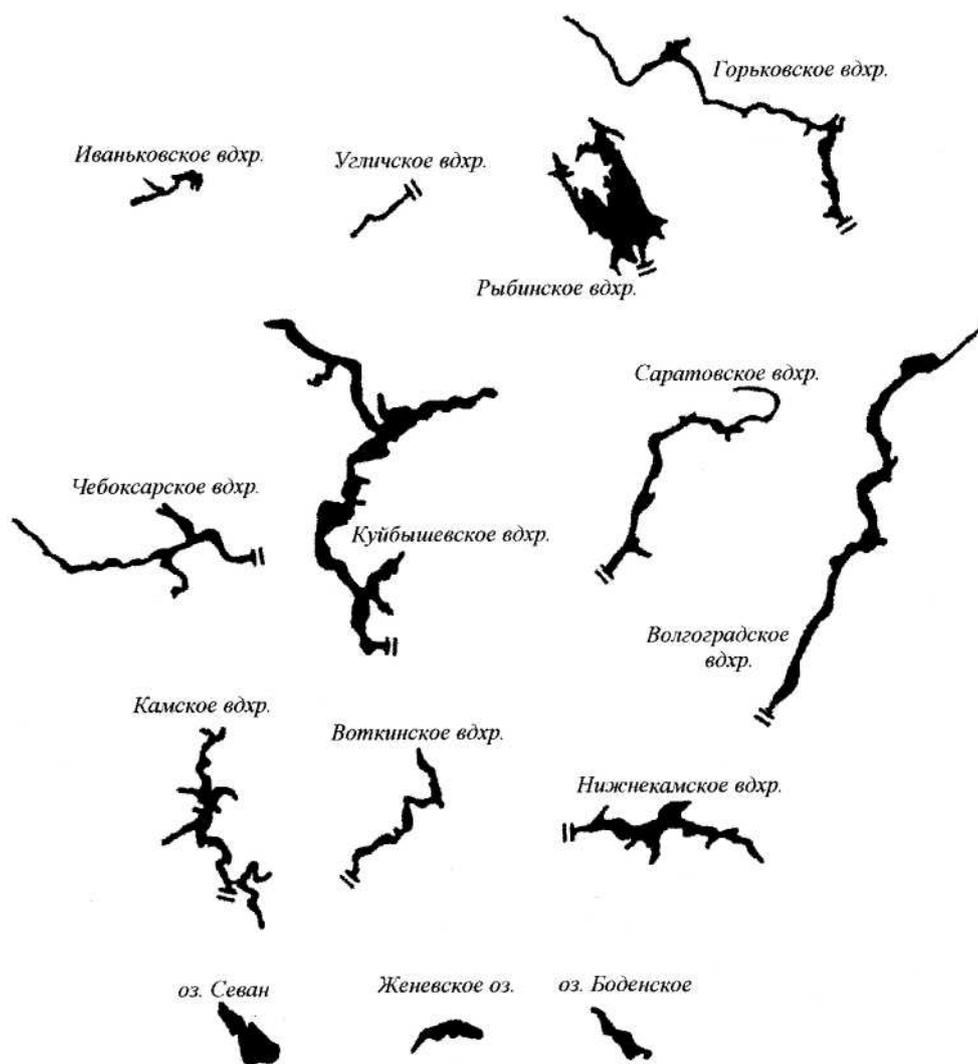


Рис. 2.3. Сравнительные размеры и контуры водохранилищ Волжско-Камского каскада и некоторых озер [Авакян, Лебедева, 2002]

транспорт, водообеспечение промышленности и жилищно-коммунального хозяйства. Однако экологическое значение Волжско-Камского каскада (как и других водохранилищ, особенно равнинных) далеко не однозначно. С одной стороны, водохранилища перерабатывают и депонируют огромное количество загрязнений, поступающих в Волгу и Каму со сбросными водами промышленных и коммунальных предприятий, стоками с городских территорий и сельскохозяйственных полей. Какой была бы вода в Волге и Каме при современном уровне поступающих в эти реки загрязнений без такой работы водохранилищ, трудно даже представить. С другой стороны, многократное замедление прохождения воды, перегораживание рек плотинами, затопление значительных территорий водохранилищами и иные факторы имеют несомненные негативные экологические последствия.

Негативное воздействие гидрологических процессов (наводнения, подтопления, сели, засухи и пр.) проявляется в России достаточно широко, хотя и не с такой катастрофической силой, как случается в тропических странах. По данным МЧС России подвержены затоплению 400 тыс. км<sup>2</sup> территории, более 300 городов, тысячи мелких населенных пунктов с населением более 4,6 млн чел., более 7 млн га сельхозугодий. Среднегодовое воздействие от наводнений экспертно оценивается около 50 млрд руб. в год. Защищающие от наводнений гидротехнические сооружения (ГТС) из-за неудовлетворительного состояния подчас сами становятся источниками опасности. Так, в 2006 г. уровень технического состояния ГТС, подведомственных Минтрансу России, оценивался следующим образом: нормальный - 21,1 %, пониженный - 57,7%, неудовлетворительный - 16,5%, опасный - 4,8 %.

Весьма серьезные проблемы в водопользовании в России могут возникнуть вследствие глобальных климатических изменений. Изменения режима осадков, обусловленные глобальным потеплением, для России будут, скорее всего, неблагоприятными. Они проанализированы в работе [Мелешко и др., 2004] на основе расчетов по ансамблю семи моделей общей циркуляции атмосферы и океана, исходя из «умеренных» сценариев МГЭИК для задания динамики выбросов парниковых газов и аэрозолей. Значимые изменения как среднегодовой приповерхностной температуры воздуха, так и общегодовых осадков должны произойти уже в первой половине XXI века. На европейской части территории России прогнозируется ухудшение водообеспеченности. Однако более тревожными выглядят прогнозируемые изменения режима осадков. Ожидаемое существенное увеличение неравномерности выпадения осадков означает одновременное усиление угрозы как наводнений, так и засух на этой территории.

Названные прогнозы отражают прямое воздействие климатических изменений на гидрологические характеристики, основополагающие как для водообеспеченности, так и для мер по снижению ущерба от наводнений и иных связанных с гидрологическими процессами явлений. Прямое воздействие может быть усилено косвенными эффектами, обусловленными, прежде всего, ухудшением экологической обстановки на водосборах. В частности, с потеплением климата ожидается усиление горимости лесов. Эта проблема подробно исследована применительно к российским лесам в работе [Коровин, Зукерт, 2004]. В качестве основного показателя

теля в этом исследовании используется продолжительность пожароопасного сезона, для которой установлена тесная связь с длительностью вегетационного периода, а последняя зависит, прежде всего, от средней приземной температуры воздуха. Подводя итог своему анализу последствий глобального потепления для пожароопасности в лесах умеренной зоны на основе нескольких сценариев климатических изменений, авторы отмечают, что следует ожидать роста числа и площади лесных пожаров в России на 30% даже без учета их суровости, которая может добавить еще 15-30%. С учетом других факторов «в рамках рассмотренных сценариев изменения климата могут привести к росту числа и площади лесных пожаров в 1,5-2,0 раза». Отметим, что все рассмотрения в этой работе относятся к лесным экосистемам в относительно стационарном климате, независимо от того, пребывают ли они в климаксовой или одной из сукцессионных фаз. Но при значимых климатических изменениях, когда такая стационарность окажется нарушенной, для каждой лесной экосистемы начнется процесс перехода к новой экосистеме, который обязательно будет сопровождаться усилением уязвимости леса к всевозможным воздействиям, и это дополнительно усилит его горимость. Хотя прямых аналогов лесных пожаров для других экосистем (за исключением тундрового ягеля) в России нет, изменения климата приведут к росту негативных проявлений и в них (например, следует ожидать обострения процессов почвенной эрозии).

Пока повышение средней глобальной приземной температуры незначительно, несколько более существенное потепление наблюдается в отдельных регионах (прежде всего Сибири), но экосистемы реагируют на эти процессы. Так, на основании исследования данных по 13 российским заповедникам, в работе [Жоколин, Минин, 2001] констатируется: «в целом наблюдается достаточно «мозаичная» картина фенологических изменений, говорящая, что уже имеется некий «внешний климатический толчок», но пока это скорее «раскачивание» экосистем, а не их направленный сдвиг».

Ухудшение экологической обстановки на водосборах окажет негативное влияние не только на сезонное и внутрисезонное распределение речного стока, но, даже в большей мере, на качество воды в природных источниках, поскольку ухудшение здоровья среды всегда снижает ее ассимиляционный потенциал. Обострению ситуации будет способствовать и изменение потребности в воде; в частности, в черноземных областях, на юге европейской части, в степях южного Урала и других регионах следует ожидать роста потребности в воде для орошения в связи с учащением и усилением засух. Неизбежно и притом почти повсеместно возрастут затраты на обеспечение населения качественной питьевой водой. Трудно предвидеть, какие иные осложняющие факторы, в том числе существенные для водопользования, возникнут в сельском хозяйстве, которому при значимых изменениях климата не избежать весьма болезненной перестройки. Потепление климата сулит для России очевидные выгоды - если рассматривать проблему абстрактно (примером такого рассмотрения, на наш взгляд, служит работа [Глобальные..., 2000]). Среди них, прежде всего, увеличение продолжительности вегетационного периода. Однако ряд обстоятельств, среди которых едва ли не первое место занимает ухудшение водообеспеченности (а также - в других сферах - воздействие на

общественное здоровье, деградация вечной мерзлоты и пр.) станут препятствием для того, чтобы реально воспользоваться новыми возможностями в сельском хозяйстве, во всяком случае, в течение первых десятилетий после их появления. Потребуется значительные капитальные вложения и, особенно, организационные и управленческие усилия, возрастут требования к качеству и уровню квалификации труда. Россия всегда тяжело переживала эпохи перемен, не станет исключением и перемена климата.

## 2.2. Первоочередные задачи

Невысокая эффективность водопользования, недопустимо низкое качество обеспечения населения питьевой водой во многих водохозяйственных системах, неудовлетворительное состояние наиболее значимых эксплуатируемых природных водных объектов объясняются, прежде всего тем, что водное хозяйство страны по целому ряду признаков остается на уровне развития, характерном для середины прошлого века. Ошибочная ориентация на экстенсивное развитие, пренебрежение вопросами эффективности водопользования, недостаточное внимание к экологическим аспектам и другие обстоятельства определили отставание российского водного хозяйства от мирового уровня, отчетливо проявившееся уже к 1980-м гг. Беды российского водного хозяйства резко усугубились вследствие недостаточного финансирования его развития в 1990-е гг. [Данилов-Данильян и др., 2004].

Вопрос о достаточном обеспечении финансирования водного хозяйства, о возможном переводе его на самоокупаемость остро стоит и в наши дни. Однако ряд особенностей этой отрасли (прежде всего, социальные аспекты водопользования, его экологические последствия и необходимость защиты от вредного воздействия вод) исключают возможность применения каких-либо «общих» подходов и требует адекватного учета отраслевой специфики. Применительно к водопотреблению и водоотведению при всей практической сложности задачи перехода к самоокупаемости общие экономико-теоретические вопросы отчасти разработаны. Однако ситуацию в других направлениях водопользования применительно к этой задаче можно характеризовать как сугубо неясную. Параметры, регулирующие платежи за водопользование во всех направлениях, кроме водопотребления и водоотведения, определены произвольно, обоснования установленных значений отсутствуют. Весьма сомнительно, что защиту населения от наводнений (и других видов вредного воздействия вод) можно «поставить на самоокупаемость». Видимо, это одна из тех областей государственной деятельности, где участие бюджетного финансирования необходимо.

В настоящее время наиболее важными из первоочередных проблем водохозяйственного комплекса России являются:

- . неудовлетворительное качество воды в большинстве эксплуатируемых водных объектов;
- . неудовлетворительное состояние систем хозяйственно-питьевого водоснабжения;

- . ухудшение технического состояния основных производственных фондов водного хозяйства — гидротехнических сооружений;
- . расточительное водопользование;
- . недостаточная эффективность управления водными ресурсами и водохозяйственными системами;
- . малый объем работ по развитию мониторинга водных объектов;
- . недостаточная защита от негативного воздействия вод - основная причина учащающихся паводковых и аварийных затоплений и подтоплений населенных пунктов и хозяйственных предприятий;
- . учащающиеся загрязнения водных объектов при авариях на нефтепроводах, очистных и иных сооружениях.

Одним из первых шагов для решения названных проблем в части нормативного и научно-методического обеспечения управлением и охраной водных объектов необходима разработка методологии эколого-социально-экономического обоснования регулирования использования и охраны водных объектов и водных ресурсов для планирования хозяйственного использования и охраны и/или восстановления качества вод. Для этого необходимо решить следующие задачи [Данилов-Данильян и др., 2004].

1. Интенсификация использования водных ресурсов, отказ от продолжения экстенсивного водопотребления. Решающую роль в достижении этой цели при надлежит развитию рыночных отношений. Однако этот процесс не должен происходить стихийно, исключительная социальная и экологическая значимость водных ресурсов требует тщательного анализа последствий каждого намечаемого шага в расширении сферы рыночных взаимодействий. Вместе с тем необходимо как можно быстрее изживать рудименты командно-административного подхода к управлению водным хозяйством. Для этого следует:

- . обеспечить переход от начисления платы за потребление воды по нормативам к оплате водопотребления всеми потребителями только по количеству фактически полученной воды;
- . разработать и реализовать программу постепенного повышения платы за потребляемую воду до уровня, при котором полностью компенсируются все затраты на обеспечение водопотребления; повышение платы за все виды водопользования до уровня, при котором обеспечивается полное финансирование мер для устойчивого воспроизводства качества водных ресурсов и поддержания всех зависящих от них экосистем и абиотической среды; использовать при этом теоретические разработки по рентообразованию в водопользовании;
- . стимулировать водопользователей к внедрению водосберегающих технологий платой за водопользование и налоговыми льготами, а также другими элементами финансового механизма;
- . развивать конкурентные формы обеспечения спроса на воду всеми видами водопользователей.

2. Обеспечение надежного, безопасного и устойчивого питьевого водоснабжения. Для этого в системах питьевого водоснабжения необходимо совместное использование источников как поверхностных, так и подземных вод при строгом

соблюдении экологических норм, обеспечивающих их неистощительную эксплуатацию, и применение современных технологий водоподготовки. Важную роль в решении этой задачи имеет и экономия воды, поскольку неоправданно высокий объем забираемой и, в значительной мере, теряемой при доставке потребителю и использовании воды - фактор, повышающий неустойчивость водоснабжения.

3. Разработка системы защиты населения и хозяйственных объектов от вредного воздействия вод, прежде всего наводнений. Это наукоемкое направление требует совершенствования моделей, объясняющих механизмы возникновения и развития наводнений, улучшения методов прогноза наводнений и их последствий, совершенствования системы гидрометеорологического мониторинга, а также капитальных мер по реконструкции ряда водохранилищ, защите городов, поселков и хозяйственных объектов, в ряде случаев - вывода населенных пунктов из опасных зон. При принятии решений о выделении территорий под строительство новых объектов различного назначения необходимо учитывать вероятность их затоплений и подтоплений, возможные ущербы от наводнений, необходимость страхования и др.

4. Разработка и реализация системы мер, направленных на восстановление качества воды в водных объектах, испытавших сверхнормативное антропогенное воздействие. Улучшение систем очистки сточных вод не может полностью решить эту проблему, не менее важно наведение порядка на водосборных территориях, строгое соблюдение установленного законодательством режима хозяйственной деятельности и ограничений природопользования в пределах водохранных зон и прибрежных защитных полос, проведение специальных реабилитационных мероприятий, ликвидация негативных последствий гидромелиорации и пр. Эта деятельность должна проводиться под руководством и при строгом контроле государственных органов управления водным хозяйством и экологического контроля, однако в полной мере она осуществима только при активном участии органов местного самоуправления, общественности и бизнеса. Обеспечение заинтересованности бизнеса в таком участии - серьезная и ответственная экономическая задача, при решении которой особенно необходимо использовать зарубежный опыт, поскольку применительно к российским рыночным структурам пока практически не было даже попыток подхода к ней.

5. Существенное повышение технического уровня:

- комплексов водоподготовки, в частности, внедрение систем поддержки принятия оперативных инженерных решений, использование прогрессивных методов обеззараживания воды, современных химических средств, систем мониторинга качества воды в водопроводных сетях;
- систем водоочистки в промышленности и коммунальном хозяйстве, чтобы гарантировать нормативный уровень качества сбрасываемых сточных вод;
- оросительных систем в сельском хозяйстве.

6. Разработка и внедрение систем управления водными ресурсами и водохозяйственными системами (в частности, на бассейновом уровне) на основе информационно-вычислительных комплексов, использующих гидрологические, эколого-экономические и экономико-математические модели. Это направление требует

существенных бюджетных затрат на а) оборудование, б) научные исследования, в) разработку моделей и программных средств, г) подготовку кадров. Недооценка важности последней - причина недостаточного финансирования затрат по трем первым из указанных статей. Объективные тенденции (климатические изменения, усиление дефицита воды в наиболее развитых районах, продолжающийся рост антропогенной нагрузки на экосистемы и т.п.) таковы, что сложность задач управления водными ресурсами и водным хозяйством нарастают. Сохранение нынешнего уровня технической и методологической поддержки системы управления и квалификации занятых в ней кадров неизбежно приведет к дальнейшему снижению качества управления. Опережающее (в сравнении с ростом сложности задач управления) повышение этого уровня абсолютно необходимо для решения задач, стоящих перед водным хозяйством.

7. Улучшение качества гидропрогнозов, необходимое для повышения эффективности всех видов водопользования, в частности, управления режимом работы ГЭС. Заблаговременность и оправдываемость гидропрогнозов в России отстают от современного уровня. Необходимо, в частности, радикально модернизировать информационную базу - гидрометеорологическую сеть, понесшую в последние 15 лет большие потери. Задача состоит не в том, чтобы ее «восстановить», а в том, чтобы оптимизировать на основе современных технологий мониторинга, прежде всего аэрокосмических.

Методы решения названных задач должны основываться на следующих принципах:

1) основополагающим в управлении водными ресурсами должен быть бассейнный подход и бассейновые соглашения как эффективный инструмент его реализации;

2) Для информационного обеспечения управления водными ресурсами (по становки целей, определения задач и методов регулирования, использования и охраны водных объектов, оценки эффективности соответствующих мер) необходимо научно обоснованный выбор эколого-социально-экономических индикаторов состояния и значимости водных объектов.

3) Для этих целей необходима также достоверная информация о хозяйственных объектах - водопользователях, системе расселения, инфраструктуре и т.п.

4) Рациональное разграничение функций федеральных и региональных органов государственной власти, органов местного управления и водопользователей в части управления водными ресурсами должно быть законодательно определено.

Для решения возникших проблем необходимо разработать и последовательно осуществлять государственную политику, направленную на обеспечение устойчивого водопользования. В возможно короткие сроки это позволило бы начать работу по решению указанного комплекса проблем. С этой целью в 2009 г. разработана и принята Правительством «Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года», определяющая основные направления действий в водоресурсной сфере. Основными целями Водной стратегии Российской Федерации являются: 1) гарантированное обеспечение водными ресурсами устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации; 2) сохранение и восста-

новление водных объектов до состояния, обеспечивающего экологически благоприятные условия жизни населения; 3) обеспечение защищенности населения и объектов экономики от наводнений и иного негативного воздействия вод. Реализация разрабатываемых в рамках Стратегии мероприятий позволит обеспечить: удовлетворение потребностей в водных ресурсах всех категорий водопользователей, в том числе за счет повышения рациональности и обеспечения комплексности использования воды. Предполагается поэтапное улучшение качества воды и санитарно-эпидемиологического состояния водных объектов, решение проблем охраны водных экосистем путем сокращения поступления загрязняющих веществ в водные объекты; повышение уровня безопасности населения и объектов экономики от негативного воздействия вод (наводнения, подтопление и др.). Стратегия включает модернизацию и строительство производственной инфраструктуры водохозяйственного комплекса с учетом передовых мировых достижений, повышение конкурентоспособности отечественной продукции и технологий на внутреннем и мировом рынке, увеличение объемов научно-технических разработок, развитие инновационной активности предприятий и организаций водохозяйственного комплекса и сопряженных видов экономической деятельности [Данилов-Данильян, Болгов, 2009].

Россия исключительно богата водными ресурсами, и в условиях дефицита воды во многих странах это возбуждает желание продавать ее, перераспределяя речной сток самым примитивным, зато привычным способом - рытьем каналов. Каждый шаг по этому пути означал бы закрепление сырьевой ориентации российской экономики, ее дальнейшее технологическое отставание, рост ее неустойчивости со всеми вытекающими отсюда последствиями. Россия должна выбрать путь интенсификации своей экономики, а для этого надо развивать не новые сырьевые отрасли взамен существующих, а ресурсосбережение. В полной мере это относится и к водопользованию, поскольку его эффективность у нас совершенно недостаточна, состояние водных объектов в промышленно развитых регионах неудовлетворительно, жилищно-коммунальный сектор пребывает на уровне - в лучшем случае - пятидесятилетней давности (если судить по развитым странам), а новые технологии водопользования в сельском хозяйстве практически не внедряются. При выборе стратегии интенсификации водопользования в собственном хозяйстве наша страна сможет принять активное эффективное участие в разрешении проблемы дефицита пресной воды в Узбекистане, а также, возможно, в Казахстане и Туркменистане, поскольку у России есть все необходимое, чтобы стать технологическим лидером для этих республик.

### **2.3. Долгосрочные задачи**

В рассуждениях о будущем российской экономики обычно слышатся призывы к рывку в постиндустриальный мир, к переходу от сырьевого хозяйства к высокотехнологичному. Для такого перехода имеются важные предпосылки, но нельзя игнорировать и весьма серьезные препятствия. По удельным экономиче-

ским показателям наша страна существенно отстаёт от развитых государств. У нас неблагоприятная демографическая ситуация, её радикальное изменение требует длительного времени. Положение усугубляется потерями интеллектуальных ресурсов из-за «утечки мозгов», и хотя в последние годы она заметно замедлилась, но уже понесенные утраты весьма значительны. Недостаток финансирования российской науки в течение более чем полутора десятилетий снизил как её результативность, так и потенциал. Эти долгосрочные факторы будут остро сказываться именно в тот период, который станет ключевым для перехода к высоким технологиям. Поэтому маловероятно, что Россия сможет в течение двух-трех десятилетий преодолеть научно-техническое отставание от развитых стран по всему спектру высокотехнологичной продукции. Следовательно, необходимо выбрать приоритетные направления экономического развития, исходя из объективных преимуществ, которыми располагает страна. Представляется, что главное преимущество России в «постнефтяной» период - водные ресурсы, по их валовым запасам она занимает второе место в мире.

Дело не только в запасах, но и в мировой конъюнктуре, в ожидаемых изменениях в ней, в тенденциях водопотребления, которые отчётливо выявились в последние десятилетия, и факторах, определяющих эти тенденции. На рис. 2.1 был показан прогноз роста водопотребления (в трех вариантах) и динамики объема доступных водных ресурсов. Согласно этому прогнозу, примерно между 2035 и 2045 гг. объём потребляемой пресной воды сравняется с её доступными сохранившимися ресурсами. Очевидно, подобная ситуация - индикатор острейшего кризиса. Однако экстраполяционный прогноз такого типа не следует воспринимать как предсказание. Не все водные ресурсы, которые могут быть отнесены к экономически доступным, будут использованы даже в 2045 г. - по той причине, что они расположены в водообеспеченных (в расчёте на душу населения) странах - России, Канаде, Бразилии, а проблема вовлечения этих ресурсов в хозяйство на территориях без развитой инфраструктуры очень сложна (заметим, что территория севернее широты Калгари в Канаде почти не осваивается - такой была и пока остается политическая установка).

Отсюда следует, что глобальный водный кризис наступит раньше, чем одна из восходящих кривых водопотребления (соответствующая реальному развитию событий) пересечётся с нисходящей кривой доступных ресурсов (см. рис. 2.1). В реальности подобное пересечение вообще невозможно: кривая водопотребления в достаточной близости к уровню предельно доступных запасов не может подниматься так, как её варианты, представленные на рис. 2.1, ибо приближение глобального водного кризиса, сопровождаемое повышением региональных цен на воду и мировых цен на водоёмкую продукцию, остановит рост потребления воды. Кривые, демонстрируемые экстраполяционным прогнозом (он в подобных случаях выступает как предупреждающее знание), в ходе реализации процесса трансформируются силами, не принимаемыми во внимание при экстраполяции, - примерно так, как показано на рис. 2.4. С одной стороны, замедлится уменьшение объёма доступных ресурсов, потому что люди начнут беречь воду, с другой стороны, упадёт темп роста водопотребления - через 20-25 лет почти до нуля. Но

если вместо одного из вариантов, представленных на рис. 2.1, реализуется что-либо похожее на рис. 2.3, значит, произойдут глубочайшие сдвиги в мировой экономике, и их движущим фактором будет дефицит пресной воды в мире. Это произойдет с той же непреложностью, с какой выполняются законы природы. Другой вопрос, к каким экономическим, социальным и политическим последствиям приведут эти сдвиги. Ответ на него определяется тем, станут ли они результатом действия только стихийных сил экономического и социального развития (прежде всего рынка), перед которыми цивилизация окажется бессильной, или на них существенно повлияют целенаправленные действия, призванные обеспечить устойчивое развитие цивилизации в условиях глобальной нехватки пресной воды.

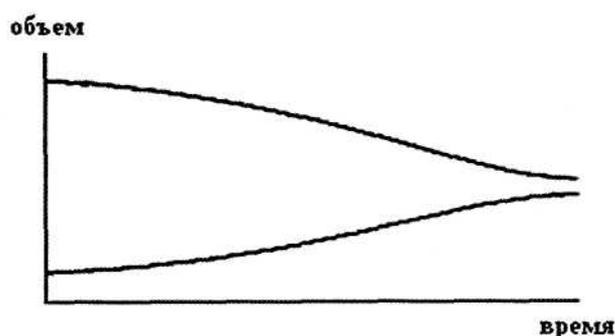


Рис. 2.4. Возможная динамика глобального потребления пресной воды и ее доступных ресурсов

Продолжение роста водопользования с темпами, характерными для второй половины XX века, уже невозможно. Данные о сооружении крупных водохранилищ в XX веке, которые были приведены на рис. 1.10 и 1.12, показывают резкое замедление гидростроительства в последние десятилетия. Это объясняется тем, что возможности крупномасштабного гидротехнического строительства, отвечающего критериям экономической целесообразности, в Европе и США практически уже исчерпаны. Именно этим, а не экологическими ограничениями, как нередко объявляется, следует объяснить весьма заметный спад такой деятельности в указанных регионах в последние годы. В развивающихся странах уровень использования гидропотенциала заметно ниже, соответственно больше возможностей для возведения крупных гидротехнических сооружений. Но здесь спад активности обусловлен, прежде всего, недостатком инвестиционных средств [Данилов-Данильян, 2005]. Этот недостаток только усилился в результате глобального финансово-экономического кризиса 2008 г., который усугубил скептицизм в отношении подобных вложений в развивающиеся страны (кроме Китая) из-за сильно возросших оценок риска.

Таким образом, мировые ресурсы пресной воды, которые с приемлемыми затратами могли бы быть вовлечены в экономику, близки к исчерпанию. Между тем рост населения в мире будет продолжаться ещё по крайней мере полвека, хотя и уменьшающимися темпами. Однако не только дополнительное население обусловит рост потребности в воде. Такой рост поддерживается стремлением всех стран, прежде всего развивающихся, к улучшению качества жизни, невозможному без решения водохозяйственных проблем.

Выше отмечено, что затраты на транспортировку воды в масштабах её промышленного, хозяйственно-питьевого и сельскохозяйственного применения (в км<sup>3</sup>) претерпевают резкий скачок при пересечении границ бассейна, поэтому мировой рынок воды (точнее, соответствующий сектор мирового рынка) не имеет значимой перспективы (хотя бассейное и иногда региональные рынки будут развиваться). Исключительно благоприятные перспективы имеют другие секторы мирового рынка - те, что обеспечивают интенсивное, а не экстенсивное развитие водопользования.

На мировом рынке, вне всякого сомнения, произойдут радикальные изменения, но не в плане расширения торговли водой как таковой. Во-первых, будут расти производство и продажи водосберегающих и водоэффективных технологий, которые позволяют лучше использовать имеющуюся воду, при её производственном потреблении выпускать большее количество продукции на единицу затрат ресурса. Такие технологии - важнейший фактор, благодаря которому удастся прекратить рост водопотребления. Во-вторых, будет развиваться производство и расширяться рынок водоохраных технологий - тех, которые позволяют сберегать воду, минимизировать вмешательство человека в гидрологический цикл и процессы естественного воспроизводства водных ресурсов. Такие технологии дадут возможность замедлить и впоследствии остановить сокращение экономически доступных воспроизводимых водных ресурсов.

Но самое главное - развитие рынка водоёмкой продукции, которую мировое хозяйство не умеет производить без больших затрат воды. Зачем транспортировать воду, когда можно возить водоёмкую продукцию, которая по весу меньше воды в сотни и тысячи раз? Страна, не обеспеченная необходимым количеством воды, но располагающая средствами для финансирования своего развития, сопоставит два варианта: построить завод по производству водоёмкой продукции (химического волокна, полимерных плёнок, целлюлозы или бумаги) в нескольких тысячах километрах за своими границами и ввозить эти продукты или же гнать к себе купленную воду для аналогичных заводов, построенных на собственной маловодной территории.

Подчеркнём, что рынок водоёмкой продукции - это рынок не сырья, а продукции, в том числе высокого технического уровня, высоких стадий переработки (в технологических цепочках). И универсальность использования воды во всём хозяйстве как раз и позволяет обеспечить его общий технический прогресс, чего не происходит при развитии собственно сырьевых отраслей. Для эффективного участия страны в качестве продавца на рынке водоёмкой продукции одних запасов природного ресурса мало - необходимо и использующее его производство, а не только добыча и транспортировка сырья. Используемый ресурс - пресная вода - воспроизводимый, неиссякающий (естественно, при выполнении водоохраных правил, соблюдении гидрологических и экологических норм эксплуатации). Для развития водоёмких производств, естественно, нужны и другие ресурсы - углеводороды, которые используются и как энергетическое, и как химическое сырьё, лес, руды цветных и чёрных металлов, земли, пригодные для ведения современного сельского хозяйства.

Рассмотрим перспективы выхода России на рынок водоёмкой продукции. Для промышленности они, несомненно, очень высоки. К весьма водоемким отраслям относятся все основные подотрасли электроэнергетики, и у России здесь весьма солидный технологический опыт и научный задел. Значительная часть оборудования на наших электростанциях морально устарела и физически изношена, но перспектива экспорта электроэнергии может послужить стимулом для обновления. Вода в значительных количествах необходима для металлургического производства, а СССР 20 лет назад был мировым лидером по объёмным показателям выплавки стали и ряда цветных металлов. Исключительно водоёмкая отрасль - химия полимеров - представлена в России как промышленными предприятиями, так и научными коллективами, способными вывести её на высокий уровень эффективности. Существенным обстоятельством является и тот факт, что продукция химии полимеров используется при производстве технологий интенсивного водопользования (полимерные трубы, фильтры и пр.). Это может стать стартовой площадкой для прорыва и на рынок высоких технологий данного профиля.

В зарубежных исследованиях проблем дефицита воды внимание всегда акцентируется на продукции не промышленности, а сельского хозяйства. На первый взгляд, здесь не найти особенно радужных перспектив для нашей страны. Холодный климат, бегство молодёжи из села, обезлюдившие деревни, массовый алкоголизм среди оставшегося там не только мужского, но и женского населения, утрата традиций ведения сельского хозяйства - всё это хорошо известные и весьма негативные внутренние обстоятельства. К ним добавляется такой весьма существенный внешний фактор, как заниженные цены на сельскохозяйственную продукцию на мировом рынке. Тем не менее, острота неизбежного глобального водного кризиса заставляет внимательно рассмотреть и это направление.

Заниженные мировые цены на продукты питания - результат хорошо спланированной и реализованной политики развитых стран. В данный момент такие цены еще выгодны для них, как были выгодны заниженные цены на нефть в 1950-1960-е гг. Но так будет не всегда. Как только в глобальном масштабе станет ощущаться недостаток продовольствия (именно в глобальном масштабе, а не в отдельных странах вследствие неурожаев или иных относительно случайных обстоятельств), и это станет фактором международной нестабильности, причиной активизации терроризма и т.п., цены на сельскохозяйственную продукцию начнут расти. Роль сурового климата часто переоценивается (см. об этом [Данилов-Данильян, 2006]). Даже в условиях глобального потепления России не стоит надеяться стать экспортёром, например, хлопчатника. Однако когда-то наша страна была главным в мире экспортёром зерна, и это - лучшее доказательство того, что по природным условиям она может играть на рынке продовольствия далеко не последнюю роль и сегодня. Речь идёт не о том, чтобы сеять пшеницу в бассейнах Яны или Индигирки. Надо использовать ту огромную (например, по западноевропейским масштабам) территорию, где у нас вполне приемлемые условия для сельского хозяйства. Таких урожаев и надоев, как во Франции или Нидерландах, у нас, скорее всего, не будет, но ведь по затратам на добычу и доставку внешнему покупателю наша нефть тоже примерно в 8 раз дороже, чем в Кувейте. Наконец, соци-

альные и демографические факторы в российской деревне - это проблемы, которые необходимо преодолеть независимо от того, что мы собираемся делать на внешнем рынке. Возможно, что одним из решающих моментов здесь должна стать миграционная политика. Так или иначе, но без возрождения сельского хозяйства у России нет будущего.

Нередко говорят, что вода на мировом рынке скоро станет товаром, который по физическим объёмам и финансовым объёмам продаж будет вполне сопоставим с нефтью. Анализ показывает, что это невозможно в силу комплекса причин. Одна из них - колоссальная разница в физических объёмах потребления воды и нефти. Одна из стратегических задач управления развитием российской экономики состоит в том, чтобы определить, какие отрасли наиболее перспективны в этом аспекте, создать благоприятные условия для их развития, синхронизированного с ожидаемыми неизбежными сдвигами на мировом рынке. Вполне вероятно, что именно производство водоемкой продукции станет доминирующим направлением для отечественной экономики в «постнефтяной» период. Эти отрасли и должны стать «заказчиками» на высокие технологии, специалистов, инфраструктуру и пр.

Перестройка структуры мировой экономики под давлением угрозы глобального водного кризиса формирует исключительно благоприятные условия для водобеспеченных стран, поскольку неизбежен рост спроса и цен на водоемкую продукцию. Её экспортёры окажутся в положении, аналогичном тому, которое обеспечивает благоденствие нынешних экспортёров нефти. Воспользоваться шансом можно будет только при условии серьёзной подготовки к развитию экспортных водоемких производств.

Сейчас большое внимание уделяется вопросам энергетической безопасности. В условиях глобального водного кризиса на первый план выйдет водная безопасность. Мировое сообщество будет трактовать её как такое распределение воды и водоемкой продукции, при котором не возникает угрозы мировой стабильности по причине водных войн, водного терроризма и т.п. Соответственно, мировое сообщество будет заинтересованно следить за эффективностью и полнотой использования водных ресурсов там, где они имеются. Тогда понятие водной безопасности на национальном уровне будет предполагать, во-первых, удовлетворение потребностей экономики страны в водных ресурсах и, во-вторых, соответствие потребностям мирового сообщества в эффективном использовании избыточных для национальной экономики водных ресурсов. Здесь нет противоречия между общемировыми и национальными интересами, поскольку для страны выгодно эффективно и устойчиво использовать свои ресурсы, выручая при продаже излишков, как минимум, нормальную прибыль. Реальное противоречие в другом: между интересами страны и способностью её элиты (хозяйственной, административной, политической) обеспечить адекватное соблюдение таких интересов.

Проблема выбора стратегии развития российской экономики в «постнефтяном» периоде в научной постановке не рассматривается ни в отечественной, ни в мировой литературе. (Заметим, что даже если истощение запасов нефти наступит значительно позже, чем сейчас прогнозируется, экономику России крайне желательно диверсифицировать, развивая другие комплексы.) Не изучалась также роль

водных ресурсов как структурообразующего фактора для реального сектора народного хозяйства России. Задачи водного хозяйства не ставились и не анализировались для условий, когда оно оказывается центральной ресурсообеспечивающей отраслью. Возможности развития производства водоёмкой продукции в России практически не исследовались в общей народнохозяйственной постановке, хотя известны работы по отдельным отраслям (гидроэлектроэнергетика, отчасти орошаемое земледелие) с рассмотрением частных вопросов. Системную, широкомасштабную, много- и междисциплинарную научную проработку данных проблем нельзя откладывать до той поры, когда глобальный водный кризис из прогнозируемого превратится в реальный, к ней необходимо приступить уже сейчас.

Дефицит пресной воды - не единственный фактор, определяющий предстоящие радикальные сдвиги в мировой экономике, но один из важнейших, значение которого будет непрерывно возрастать в течение ближайших 30-40 лет. С проблемой дефицита воды в мировой экономике удастся справиться не за 15-20 лет, на это уйдут, наверное, две трети текущего столетия. Для того чтобы она не стала для нас угрожающей, а наоборот, определила новый источник благосостояния для страны, надо со всем вниманием и ответственностью относиться к её решению.

Для реализации мер, которые обеспечат нам на мировом рынке водоёмкой продукции место ключевого игрока, необходима национальная программа. Нужны серьёзные разработки по долгосрочной стратегии перестройки реального сектора экономики, целенаправленная работа всех, кто этой экономикой управляет, что ставит совершенно новые задачи перед нашей наукой. В реализацию такой национальной программы должно быть вовлечено почти всё народное хозяйство - ведь без воды ни одна отрасль жить не может. Ощущается потребность в научной проработке ситуации, которая сложилась сейчас в мире в связи с нарастающим дефицитом воды, и в возможных сценариях развития.

Чтобы стать ключевым участником мирового рынка водоёмкой продукции, требуется повысить технический уровень водохозяйственного комплекса, создать и внедрить новые технологии в традиционных отраслях - энергетике, металлургии, химической и целлюлозно-бумажной промышленности, сельском хозяйстве. Их разработка на базе достижений фундаментальной науки должна быть проблемно ориентирована, нацелена на решение задач, которые будут определены в долгосрочной программе трансформации реального сектора экономики.

Интересы Российской Федерации в данном случае вполне совпадают с интересами мирового сообщества. Многие страны будут предъявлять спрос на водоёмкую продукцию, и нам выгодно удовлетворять такой спрос, потому что это вопрос не только экономической эффективности развития нашего хозяйства, но и нашей безопасности, устойчивости позиций России в мире.

#### **2.4. Заключение**

Нарастающий водный кризис бросает человечеству вызов. Дефицит воды становится глобальной проблемой и основным фактором, сдерживающим разви-

тие мировой экономики. Потребление воды приближается к объему доступных ресурсов. Для ряда стран дефицит пресной воды уже стал реальным ограничителем экономического роста и причиной усиления нищеты и социальной напряженности. Проблемы пресной воды являются сюжетом глобальных политических и экономических игр и источником потенциальных международных конфликтов. Остро стоит проблема согласования водной политики различных государств. Научно обоснованные рецепты решения этой проблемы отсутствуют.

Неравномерное распределение ресурсов пресной воды нельзя «исправить» с помощью ее транспортировок на дальние расстояния в объемах, требующихся для промышленности и сельского хозяйства. Затраты на транспортировку претерпевают резкий скачок при пересечении границ водных бассейнов. Мир будет решать проблему дефицита воды развитием водосберегающих и водоохраных технологий, а также экспорта-импорта водоемкой продукции. Под воздействием нарастающего дефицита воды в системе цен на мировом рынке произойдут радикальные сдвиги, резко подорожают все виды водоемкой продукции. Страны, обладающие ресурсами пресной воды, превосходящими их внутренние потребности, окажутся в весьма выгодном экономическом положении, особенно в случаях, когда они будут располагать и прочими ресурсами, необходимыми для производства водоемкой продукции. Российская Федерация - одна из немногих таких стран. При перестройке структуры реального сектора экономики в указанном направлении водное хозяйство, оставаясь важной инфраструктурной отраслью, становится поставщиком важнейшего вида сырья для основных экспортных отраслей. Обеспечение этой функции потребует изменения экономических механизмов водопользования. Возможности развития производства водоемкой продукции в России практически не исследовались в общей народнохозяйственной постановке, хотя известны работы в частных постановках. Научную проработку этих проблем нельзя откладывать до времени, когда глобальный водный кризис из прогнозируемого превратится в реальный.

Для устойчивого развития водного хозяйства России, при котором не разрушается его природная основа и при этом создаваемые условия жизни не влекут деградации общества и социально-деструктивные процессы не развиваются до масштабов, угрожающих его безопасности, необходимо согласование стратегий развития отраслей и регионов, а также водоохраны и мер по защите от вредного воздействия вод. В системе управления водными ресурсами необходимо создавать условия для воспроизводства и эффективного использования природных вод, улучшения их качества, повышения надежности и безопасности водообеспечения, восстановления экологического благополучия - достигать компромисса между желаемым и возможным. К поиску социально-экологического компромисса пока подходят как к задачам политики, решаемым на интуитивном уровне. Решение этих задач требует научного обоснования, поскольку цена ошибочных решений весьма велика.

Решение проблем выработки стратегий использования водных ресурсов государствами и согласования интересов водопользователей внутри страны связано с необходимостью рассмотрения огромного числа вариантов. Непосредственная

экспериментальная проверка сравниваемых вариантов не представляется возможной. Поэтому математическое моделирование оказывается единственной альтернативой принятию волюнтаристских решений. Оно является аппаратом, используемым в данной работе при анализе элементов согласования стратегий водопользования.

## Глава 3

# ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

### 3.1. Подход к согласованию стратегий использования водных ресурсов

Регуляторами водопользования являются водохозяйственные системы (ВХС), представляющие собой совокупности взаимодействующих элементов: источников воды, водопользователей, средств доставки и управления режимом и качеством водных ресурсов. Источниками воды служат речной сток, подземные воды, вода, перебрасываемая из других регионов и т.п. В качестве основных пользователей выступают организации и предприятия сельского хозяйства, промышленности, коммунального водоснабжения, энергетики, водного транспорта, рыбного хозяйства, рекреации и защиты от наводнений. Средства доставки и управления включают в себя участки рек, каналы, трубопроводы, насосные станции, подпорные и водозаборные сооружения, водохранилища и другие технические устройства, способные осуществлять доставку водных ресурсов и управление ими. В ВХС включаются также моря, играющие роль замыкающих элементов - водохранилищ, вода из которых в систему не возвращается. Управление качеством воды осуществляется либо пользователями при водоотведении, либо путем создания специальных водоохраных зон.

В единую систему элементы ВРС объединяет общность используемых водных ресурсов, которая обуславливает взаимодействие отдельных пользователей, предъявляющих собственные требования к количеству и качеству воды, а также режиму ее подачи, и их взаимное влияние на состояние водных экосистем и характер протекания природных процессов. Системообразующая роль водных ресурсов возрастает с усложнением ВХС, связанным с ростом промышленных и сельскохозяйственных комплексов, интенсивным процессом урбанизации и необходимостью сохранения или улучшения качества водной среды и примыкающих к ней территорий.

ВХС выступают посредниками между природными объектами и водопользователями, согласуя потребности хозяйства и общества в водных ресурсах с возможностью их удовлетворения. Технический прогресс, расширение производства, повышение требований к качеству жизни и забота об улучшении состояния окружающей среды определяют соответствующие преобразования в структуре, параметрах и правилах управления ВХС. Стратегии таких преобразований должны

быть направлены на устойчивое развитие ВХС при всех возможных условиях функционирования. Выработка стратегий, удовлетворяющих этому принципу адаптивного управления, связана со значительными трудностями, обусловленными стохастическим и неопределенным характером процессов поступления и использования водных ресурсов. Возникает риск принятия необоснованных решений.

ВХС являются элементами инфраструктуры по обеспечению водными ресурсами производства и общества. Для создания условий устойчивого развития водоемких отраслей экономики, удовлетворения потребностей населения в воде и экологически приемлемой среде обитания требуется опережающее развитие ВХС. Природно-технический комплекс ВХС включает в себя водохранилища, каналы, трубопроводы, шлюзы, насосные станции, подпорные, водозаборные, очистные и другие сооружения, проектирование, строительство и реконструкция которых требуют значительных затрат труда, капиталовложений и времени. Соответствующие этому стратегии развития ВХС должны охватывать достаточно длительный расчетный период, ориентированный на 20-, 30-летнюю и более отдаленную перспективу. Такие стратегии приходится выработать в условиях значительной неопределенности структуры, форм и масштабов водопользования, обусловленной научно-техническим прогрессом и коренным преобразованием всего хозяйственного механизма. Неопределенность проявляется также в характеристиках водных ресурсов, показатели которых могут существенно трансформироваться, например, в связи с возможными изменениями климата.

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 строятся числовые оценки значимости сценариев, которые, будучи нормированы, обладают всеми свойствами вероятностей: они неотрицательны, характеризуются аддитивностью по любой совокупности, а сумма этих оценок для всех сценариев равна единице. Такой субъективно вероятностный подход связан с риском отождествления мнений экспертов, отражающих современные представления о возможности наступления будущих условий, с объективной реальностью. Однако другого не дано.

Кроме того, различные природные и частично организационно-технические процессы образуют стохастически устойчивые явления, характеризующиеся объективными вероятностями. Субъективные и объективные вероятности, которые далее не различаются и называются вероятностями, включаются в комплекс оценок ситуаций для выработки стратегий развития, базирующихся на сформированных сценариях в сочетании с физическими, техническими, экологическими, экономическими, социальными и иными условиями развития ВХС. Это позволяет перейти к уточнению постановок целей и задач управления ВХС.

Подход к выделению стратегий управления опирается на теорию управления ВХС, оперирующую как текущими поставками водных ресурсов, так и их гарантированными значениями. Величины текущих поставок воды, вообще говоря, варьируются при различных реализациях стохастических условий функционирования ВХС, характеризуя тактику управления. Гарантированные значения объе-

мов и/или расходов водных ресурсов (количество водных ресурсов, на которые могут рассчитывать пользователи) играют роль стратегических факторов производства. Они и их надежности (вероятности того, что количество предоставляемых пользователям водных ресурсов не меньше гарантированных величин) характеризуют ВХС как партнера в хозяйственной деятельности. С ними связано планирование необходимых подготовительных работ и использование других неводных факторов производства. Гарантированное водопользование отражает стратегию управления ВХС, в которой учитываются возможные отклонения расходов и объемов водных ресурсов, поступающих пользователям, от гарантированных значений. В этом подходе содержатся предпосылки управления, приспособляемого к возможным вариациям условий функционирования ВХС.

### 3.2. Гарантированное водопользование - виртуальный ресурс

Деятельность водопользователей сопряжена с риском снижения эффективности использования водных ресурсов из-за неопределенности в водообеспечении. С целью его снижения, а также постановки задач управления ВХС, были предложены понятия надежности (обеспеченности) располагаемых водных ресурсов [Hazen, 1914], гарантированного водопользования (гарантированной отдачи) и его надежности [Крицкий, Менкель, 1932], а также гарантированного качества водных ресурсов и его надежности [Бончковский, Кузин, 1986]. Эти понятия дают возможность оценивать риск пользователей ущербом - потерей в экономических результатах их деятельности (например, прибыли или валовом доходе) вследствие отклонений реальных режимов водопользования от гарантированных.

Термин *гарантированное водопользование* представляется неудачным. На самом деле, ни о каких гарантиях речь не идет. Гарантированный объем - не более чем ориентировочный (плановый) показатель, у которого не так много шансов быть выполненным. Это виртуальный ресурс, который водопользователю следует принимать во внимание при планировании своей деятельности. Далее такие показатели называются *ориентирами*.

Методология гарантированного водопользования и его надежности даёт возможность построения производственных функций, оценивающих результаты использования как водных, так и других ресурсов в условиях неопределенности. Значения этих функций  $f(X, x)$  зависят от двух групп переменных, соответствующих используемым в хозяйственной деятельности ресурсам  $x$  и их ориентирам  $X$ .

Количество используемых ресурсов может принимать значения  $x^\omega$  при различных реализациях  $\omega$  стохастических условий функционирования системы из множества возможных условий  $\Omega$ ,  $x = \{x^\omega \mid \omega \in \Omega\}$ . С ориентировочными количествами используемых ресурсов связано планирование необходимых подготовительных работ и других ресурсов, не учитываемых явно при оценке результатов производства.

Отклонение  $\Delta x^\omega = x^\omega - X$  реализуемого количества ресурсов от ориентира приводит к необходимости корректировки принятых решений и потерям в результатах хозяйственной деятельности.

Подготовка полей к орошению включает подготовку оросительной сети, техники, структуры посевов и других работ, она проводится до проявления конкретных реализаций стохастических условий и поступления водных ресурсов в расчете на использование их ориентировочных значений. Поступление водных ресурсов в объеме, меньше ориентира, означает недополив и, следовательно, уменьшение урожайности, а также делает лишними часть подготовительных работ. Использование водных ресурсов сверх ориентировочного значения не всегда возможно. Если оросительная сеть и состав сельскохозяйственных культур такую возможность допускают, то включение дополнительной техники, персонала и организация дополнительных работ осуществляются со значительно меньшей эффективностью, чем использование объема водных ресурсов, на который ориентируется оросительная сеть.

Перспективным направлением является создание рынка генерирующих мощностей электроэнергетики. Каждая электростанция берет обязательство, что поставляемая ею мощность в течение расчетного периода будет не меньше определенной величины. Величина мощности, на которую ориентируется система, покупающая электроэнергию, оплачивается. При нарушении своего обязательства электростанция платит штраф, величина которого значительно превышает прибыль от продаваемой мощности. Финансовый результат работы электростанции зависит от двух переменных - продаваемой мощности и вырабатываемой электроэнергии. Электроэнергия производится при проданной мощности в условиях, когда неопределенными являются как спрос, зависящий от погоды, хозяйственной ситуации и других причин (вроде трансляции интересного футбольного матча), так и возможности поставки электроэнергии, связанные с готовностью агрегатов станции к работе, исправностью электросетей, наличием топлива на ТЭС и водных ресурсов у ГЭС и т.п.

Иногда аналогом ресурса выступает спрос на продукцию или услуги. Например, частная школа ориентируется на определенное количество и основную специализацию учеников, оплачивающих обучение. Этому соответствуют площади арендуемых помещений, оборудование классов, преподавательский состав, закупаемые технические средства обеспечения учебного процесса и т.п. Затраты на организацию работы школы, заключение контрактов с педагогами и обслуживающим персоналом и пр. производятся при заранее не известном конкретном составе учеников. Если реальное количество учеников не достигает ориентира, прибыль школы снизится относительно той величины, которая соответствует случаю, когда ориентир был бы выбран меньшим и совпал со значением переменной состояния - реальным количеством учеников. Это произойдет как из-за уменьшения валового дохода, так и вследствие дополнительных затрат (расторжение контрактов с оказавшимся лишним персоналом и т.п.). Если количество учеников больше ориентира, дополнительные издержки, связанные с необходимостью оперативно скорректировать материально-техническое обеспечение и организацию учебного процесса, нанять дополнительный персонал и т.п., будут превосходить прирост затрат, который соответствует увеличению ориентира на то же количество учеников.

Примеры хозяйственных систем, результаты работы которых зависят от двух групп переменных: ориентировочных объемов ресурсов (или спроса) и их реализуемых значений, можно продолжить. Труднее оказались поиски противоположных примеров. Не удалось обнаружить хозяйственные системы, при оценке результатов деятельности которых не было бы необходимости наряду с величинами используемых ресурсов учитывать их ориентировочные значения. По-видимому, таковых нет.

### 3.3. Оценки эффективности использования водных ресурсов

Функцию  $f(X, x)$ , оценивающую результат использования ресурсов, без нарушения общности можно представить в виде суммы функций

$$f(X, x) = f^1(X) + f^2(X, x). \quad (3.1)$$

Функция  $f^1(X)$  характеризует результат использования ресурсов в объеме, равном ориентиру. Зависимость  $f^2(X, x)$  обычно называемая функцией ущербов, описывает потери результата, обусловленные отклонениями объемов используемых ресурсов от их ориентировочных величин. Для определенности под функцией

$$f^2(X, x) \text{ будем понимать математическое ожидание ущербов, обусловленных функционированием потребителей ресурсов в различных стохастических условиях}$$

$$f^2(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f^{2\omega}(X, x^\omega), \quad (3.2)$$

где  $p^\omega$  — вероятность исхода стохастических условий  $\omega$ . Множество стохастических условий  $\Omega$  полагаем конечным. Из соотношений (3.1) и (3.2) следует, что  $f^2(X, x)$  представляет собой математическое ожидание производственных функций, оценивающих результат деятельности системы в различных стохастических условиях:

$$f(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f^\omega(X, x^\omega) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega [f^1(X) + f^{2\omega}(X, x^\omega)]. \quad (3.3)$$

нет

необходимости в коррекции запланированного решения, поэтому

$$x^\omega = X$$

При использовании

В режиме использования избытков ресурсов, т.е. в случае

$$f^{2\omega}(X, X) = 0.$$

$$\Delta x^\omega = x^\omega - X \geq 0,$$

ориентировочного объема ресурсов, когда

ути-

лизация дополнительных ресурсов возможна только при наличии потребности в них и условий для ее удовлетворения (например, речной транспорт может использовать избыточные глубины только при наличии судов с большой осадкой и до-

$$\Delta x^\omega \geq 0$$

полнительных грузов, которые необходимо перевезти). Неравенство

03-

начает, что все координаты вектора  $\Delta x^\omega$  неотрицательны и хотя бы одна больше

$$\forall n \in N : \Delta x_n^\omega = x_n^\omega - X_n \geq 0 \text{ и } \exists n^* : \Delta x_{n^*}^\omega > 0, \text{ где } N -$$

ресурсов

$$f(X, x).$$

нуля, т.е.

Использование избыточных ресурсов осуществляется со значительно меньшей эффективностью, чем составляющая  $f^{2\omega}(X, x^\omega)$  функции  $f^\omega(X, x^\omega)$  предполагаемых (т.е. ориентири). Поэтому при  $\Delta x^\omega > 0$  неотрицательна и ее значения возрастают незначительно. Использование ресурсов при их дефиците, т.е. в случае  $\Delta x^\omega < 0$

увеличивает  $|\Delta x^\omega|$  некоторого предела - невозможностью ее производить. Дося стоимость вырабатываемой продукции, а при превышении значением полнительные затраты на поддержание данного уровня производства (в первом случае) и компенсации потерь от недодачи продукции (во втором) значительно превосходят эффект от использования предполагаемых объемов  $f^{2\omega}(X, x^\omega)$  ресурсов. Это  $\Delta x^\omega < 0$  функция отрицательна и означает, что в диапазоне значений ее значения резко убывают с ростом  $|\Delta x^\omega|$ .

В терминах производственных функций  $|\Delta x^\omega| = |x^\omega - X|$  сказанное означает, что при одном и величинах приращений функции  $f^\omega(X, x^\omega)$  том же значении модуля приращения аргумента

$$\begin{aligned} [f^\omega(X, x^\omega) - f^\omega(X, X)]_{\Delta x^\omega \geq 0} &= f^{2\omega}(X, x^\omega)|_{\Delta x^\omega \geq 0} \leq \\ &\leq [f^\omega(x^\omega, x^\omega) - f^\omega(X, X)]_{\Delta x^\omega \geq 0} \leq \\ &\leq -f^{2\omega}(X, x^\omega)|_{\Delta x^\omega \leq 0} = -[f^\omega(X, x^\omega) - f^\omega(X, X)]_{\Delta x^\omega \leq 0}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

связаны неравенствами

Как правило, при  $|\Delta x^\omega| > 0$  хотя бы одно из заменяется на строгое. Неравенства (4) являются основными соотношениями, показывающими целесообразность включения ориентировочных величин используемых ресурсов в оценку результатов функционирования производства. Первое неравенство в (3.4) указывает, что результат использования дополнительных ресурсов не превосходит результата использования того же ориентировочного количества. Последнее неравенство в (3.4) означает, что снижение результата производства при непредусмотренном дефиците ресурсов не меньше, чем то, которое является следствием уменьшения ориентировочной величины ресурса. Вся цепочка неравенств (3.4) демонстрирует, что результат использования ресурсов в ориентировочных объемах (это - «идеальные» условия) выше результата использования ресурсов в тех объемах, которые получаются в реальных стохастических условиях, когда поставляемые

Функции  $f^\omega(X, x^\omega)$  вогнуты по каждому из переменных  $X_n$  и  $x_n^\omega$  объемы отклоняются от ориентиров.

в силу закона об убывающей эффективности [Самуэльсон, 1964], в соответствии с которым с увеличением количества ресурса падает эффективность единицы использования  $f^\omega(X, x^\omega)$

по их совокупности. Этим же свойством обладают функции  $f(X, x)$ , сформированные по правилу (3.3). Однако все известные производственные функции  $f^\omega(X, x)$ , описывающие функционирование водопользователей с закрепленными параметрами,

единицы его объема. Однако это не гарантирует вогнутость

скии, 1У7У). При рассмотрении функционирования ВХС  
 вогнуты  $f^w(X, x^w)$  юсти переменных  $X$  и  $x^w$  (например, описанные в [Елахов-  
 будем предполагать по совокупности  $X$  и  $x^w$  и, следовательно, вогнутость функций  
 во- гнутость  
 $f(X, x)$ .

Пример функции  $f(X, x^w) = f^1(X) + f^2(X, x^w)$ , оценивающей использова-  
 ние водного ресурса в стохастических условиях,  
 иллюстрирует рис. 3.1, на котором представлена производственная функция  
 расположенной в Ставропольском крае Терско-Кумской оросительной системы.  
 Построение этой функции описано в

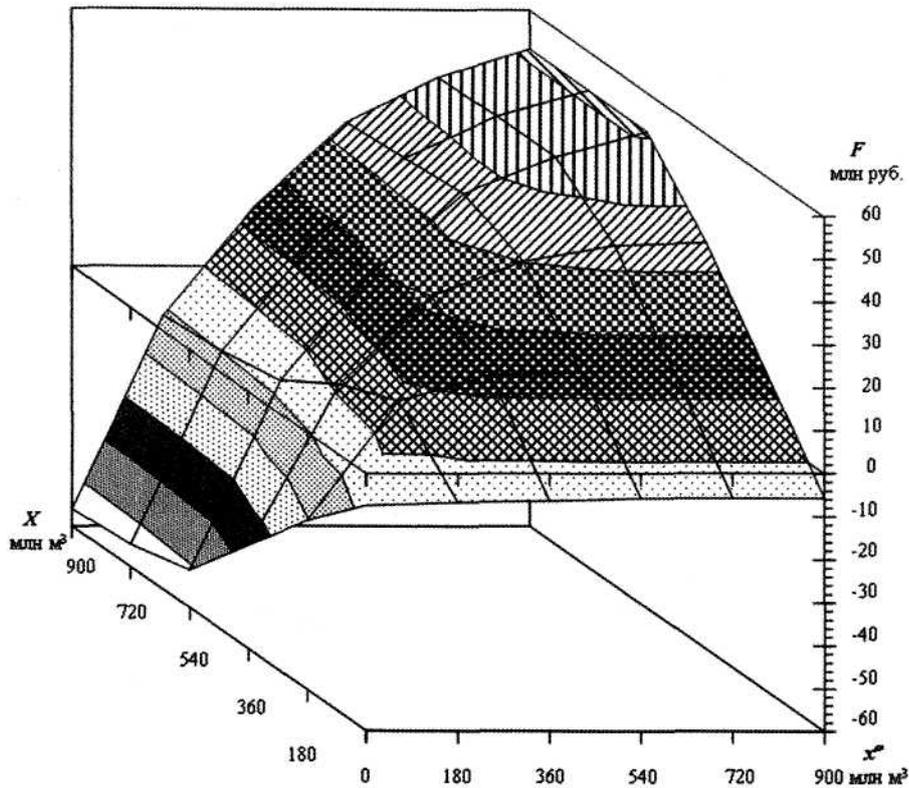


Рис. 3.1. Производственная функция Терско-Кумской оросительной системы

[Богачева и др., 2000]. В этом частном случае функция ущерба  $f^2(X, x^w)$   
 $\omega \in \Omega$ .

и та же для всех

- одна

$x^w$  как семейства функций одного переменного  $x^a$ , зависящего от параметра  $X$ , со-  
 ставляющая  $f^1(X)$  функции  $f(X, x^w)$  является верхней огибающей этого семейства.  
 Указанная особенность следует из неравенств (3.4) и свойства функций ущерба  $f^2(X, X) = 0$ .  
 При рассмотрении этой же функции двух переменных  $X$  и

выше, вогнутые. Такую трактовку функции  $f(X, x^w)$  иллюстрирует рис. 3.2, на ко-  
 Все функции указанного семейства и его огибающая,  
 как отмечено

тором прослеживается вся цепочка неравенств (3.4). В частности, сравнение гра-

фигов 1 и 4 на рис. 3.2 показывает, что при гарантированном объеме водных ресурсов  $X=360$  млн м<sup>3</sup> прибыль, получаемая с орошаемых полей при использовании реализованного объема млн м, на 10 млн руб. меньше, чем от использования того же реализованного объема при условии, что в качестве гарантированного был бы взят  $X=720$  млн м<sup>3</sup>. Неподача воды в оросительную сеть при ориентировочном объеме  $X=360$  млн м приводит к большему снижению прибыли (на 28 млн руб.), чем переход к гарантированному объему  $X=0$ .

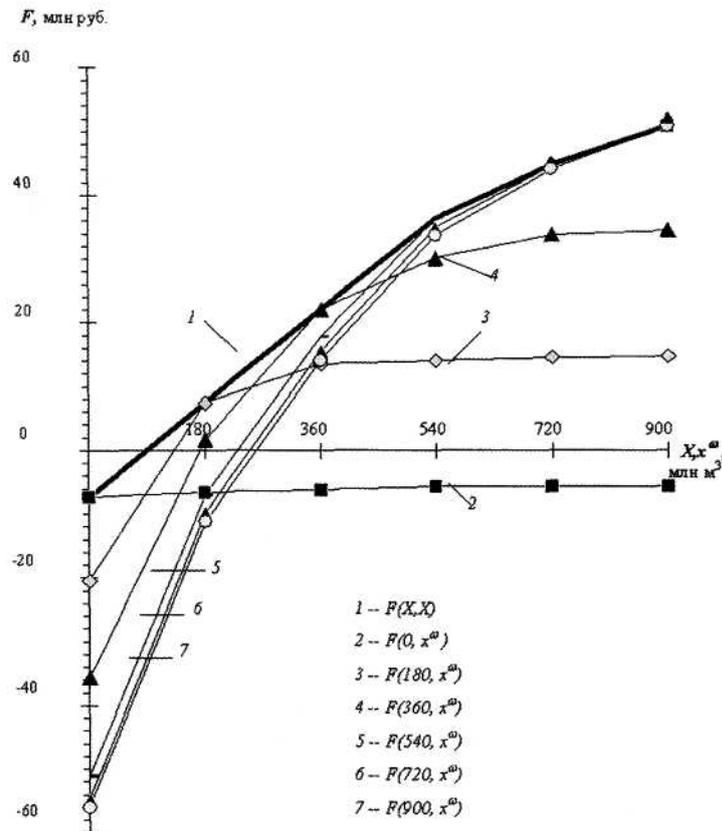


Рис. 3.2. Параметрическое представление производственной функции Терско-Кумской оросительной системы

#### 3.4. Риск, шанс и надежность

Различия между результатами использования водных ресурсов в различных стохастических условиях порождают риск снижения результата деятельности вследствие неполного (в сравнении с ориентиром) обеспечения ресурсами  $R(X, x)$  и шанс повышения результата  $D(X, x)$ , обусловленный получением дополнительного (относительно ориентира) количества ресурсов.

Под *риском* в данной работе понимается математическое ожидание ущерба (потери результата) из-за получения ресурсов в количестве, меньшем ориентировочного. В соответствии с этим риск определяется через введенную производственную функцию в виде

$$R(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} [f^{\omega}(X, X) - f^{\omega}(X, x^{\omega})]^{+} = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} [-f^{2\omega}(X, x^{\omega})]^{+} = [u]^{+} = \max\{u, 0\}.$$

$$= \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} r^{\omega}(X, x^{\omega}),$$

где  $r^{\omega}(X, x^{\omega})$  - ущерб от недополучения ресурсов в  $\omega$ -й условиях, функция

(3.5)

исходе стохастических

*Шанс*  $D(X, x)$  представляет собой математическое ожидание увеличения результата деятельности вследствие использования дополнительного количества

$$D(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} [f^{\omega}(X, x^{\omega}) - f^{\omega}(X, X)]^{+} = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} [f^{2\omega}(X, x^{\omega})]^{+} =$$

$$= \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} d^{\omega}(X, x^{\omega}),$$

ресурсов. Он также выражается через введенную производственную функцию:

(3.6)

где значение прироста результата при

исходе стохастических

условий.

$d^{\omega}(X, x^{\omega})$  Риск уменьшения результата  $\omega$ -ом

вследствие

недополучения водных ресурсов и шанс его увеличить благодаря использованию дополнительных ресурсов в оросительной системе, производственная функция которой представлена на рис. 3.1 и 3.2, при ориентировочном объеме  $X=360$  млн  $m^3$  и равновероятных объемах используемых ресурсов  $x^{\omega}=0, 180, 360, 540, 720$  и  $900$  млн  $m^3$  равны  $R(360, x)=12$  млн руб. и  $D(360, x)=5$  млн руб. Шанс значительно меньше риска, несмотря на то, что дополнительное количество водных ресурсов больше их недостачи. Такое соотношение между  $R(X, x)$  и  $D(X, x)$  является типичным.

Описанные производственные функции могут быть применены также для оценки надежности ориентировочного количества ресурсов. *Надежность* определяется как вероятность того, что объем предоставляемых ресурсов будет не меньше их ориентировочной величины

$$P(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega^{+}} p^{\omega}, \quad \Omega^{+} = \{\omega | x^{\omega} \geq X\}.$$

(3.7)

В частности, надежность

ставлена на рис. 3.1 и 3.2, при равновероятных реализуемых объемах  $x^{\omega}=0, 180, 360, 540, 720$  и  $900$  млн  $m^3$  составляет  $P(360, x)=2/3$ .

гарантируемого объема водных ресурсов  $X=360$  млн  $m^3$  оросительной системы, производственная функция которой пред-

### 3.5. Математическая модель оптимального использования ресурсов

В математических моделях, описывающих рациональное использование ресурсов, функции цели формируются из производственных функций элементов

моделируемых систем. Рассматриваемые производственные функции предполагают включение в эти модели в качестве переменных величин, наряду с используемыми ресурсами, их ориентировочных значений. Особенностью ориентиров как переменных модели является их разделение в допустимых множествах и взаимосвязь только через функции цели. Поэтому при переходе от производственных функций, в которых отсутствуют ориентировочные значения объемов используемых ресурсов, к моделям с производственными функциями, где ориентиры учитываются, структура моделей не меняется. Ниже приводится одна из таких моделей, которой описывается обоснование режимов транспортных, энергетических, водохозяйственных, информационных, технологических и других потоковых систем, функционирующих в стохастических условиях.

Модель описывается задачей В определения оптимальных потоков на сети  $\Gamma(I, S)$  с множеством вершин  $I$  и дуг  $S$ , геометрическое начертание которой соответствует схематическому изображению моделируемой системы. Вектор потоков  $X^0, x^0$ ,  $X^0 = \{X_s^0 \mid s \in S\}$  и  $x^0 = \{x_s^{\omega 0} \mid s \in S, \omega \in \Omega\}$ , моде-

составляющие которого

лирует оптимальные объемы используемых ресурсов  $x$  и их ориентировочные величины  $X^0, x^0$ . Вектор  $X^0, x^0$  максимизирует функцию цели моделируемой системы, складывающуюся из производственных функций ее элементов в предположении, что эффекты от использования ресурсов различными элементами сопоставимы в одних и тех же единицах, для определенности в рублях:

$$F(X, x) = \sum_{s \in S} f_s(X_s, x_s) = \sum_{s \in S} \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f_s^\omega(X_s, x_s^\omega) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} f_s^\omega(X_s, x_s^\omega). \quad (3.8)$$

Вектор  $X^0, x^0$  принадлежит допустимому множеству  $G_B$ , выделяемому уравнениями неразрывности потоков:

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega x_s^\omega - \sum_{s \in S_i^-} x_s + b_i^\omega = 0, \quad i \in I, \quad \omega \in \Omega, \quad (3.9)$$

ограничениями сверху и снизу на величины потоков, которые при различных исходах стохастических условий могут принимать различные значения:

$$\underline{x}_s^\omega \leq x_s^\omega \leq \bar{x}_s^\omega, \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad (3.10)$$

и их ориентиров, принимающих одни и те же значения при всех исходах

где  $\underline{X}_s \leq X_s \leq \bar{X}_s, s \in S$ , стохастических условий: фиксированное количество

$$b_i^\omega \geq 0 \quad \text{мощность источника ресурса,} \\ b_i^\omega \leq 0$$

ресурса, изымаемого из  $i$ -й вершины  $\Gamma(I, S)$ ,  $\kappa_s^\omega$  - неотрицательный коэффициент усиления  $s$ -й дуги (как правило,  $\kappa_s^\omega \leq 1$  отражающий потери ресурса,  $S_i^+$  - множество дуг, заходящих в  $i$ -ю вершину,  $S_i^-$  исходящих из нее).

Заметим, что в отличие от  $x_s^\omega$ , которые взаимосвязаны реальными потоками

системой уравнений неразрывности потоков в вершинах сети  $T(I, S)$ , потоки  $X_s$ , выражающие ориентировочные значения ресурсов, принадлежат только своим

дугам. Присутствие потоков  $X_s$  в сетевой распределительной задаче В, на которые не распространяются условия непрерывности, не нарушает наглядность потокового представления функционирования систем использования ресурсов.

В решении задачи В, наряду с оптимальными величинами используемых ресурсов  $x$  и их ориентирами  $X^\circ$ , неявно содержатся значения оптимальной надежности  $P_s(X^\circ, x^\circ)$  ориентировочного количества ресурсов, используемых элементами. Она получается при подстановке решения  $X^\circ, x^\circ$  задачи В в формулу (3.7) как побочный результат решения задачи, подобно тому как при решении задач оптимального использования ресурсов в качестве побочного результата получают оптимальные («объективно обусловленные» по Л.В. Канторовичу) оценки ресурсов. Задание надежностей  $P_s$ , отличных от оптимальных, приводит к снижению результата деятельности. При  $P_s < P_s(X_s^0, x_s^0)$  результат уменьшается из-за необходимости чаще, чем при  $P_s(X_s^0, x_s^0)$ , проводить дорогостоящие корректирующие мероприятия,

$$P_s > P_s(X_s^0, x_s^0) \text{ обусловленные отклонением}$$

ресурсов от ориентиров. При количества используемых ре-

зультат снижается из-за неполного учета возможностей производства («перестраховки»). Также неявно в задаче В содержатся оптимальные значения рисков  $R_s(X^\circ, x^\circ)$  и шансов  $D_s(X^\circ, x^\circ)$  использования ресурсов. Для этого достаточно значение оптимального вектора задачи В подставить в формулы (3.5) и (3.6).

Задача В - двухэтапная задача стохастического программирования. Стратегическими переменными (первого этапа), выбираемыми при неизвестной конкретной реализации стохастических условий, выступают потоки в дугах  $X_s$ , моделирующие ориентировочные значения объемов используемых ресурсов. В качестве тактических переменных (второго этапа), соответствующих известным реализациям стохастических условий, выступают потоки  $x_s$ , соответствующие реально используемым ресурсам (переменные состояния системы). Аналогичную роль играют переменные, соответствующие реализуемым и ориентировочным объемам ресурсов, в математических моделях, в которых структуризация систем отличается от потоковой.

Нельзя гарантировать вогнутость производственных функций  $f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$  элементов моделируемой системы и, следовательно, целевой функции всей задачи В. Поэтому задача В рассматривается как многоэкстремальная. Общих методов решения многоэкстремальных задач нет. Однако особенность задачи В, состоящей в максимизации невогнутой бисепарабельной функции (3.8), представленной в виде суммы функций, каждая из которых зависит от двух переменных, на выпуклом множестве  $GB$ , выделяемом линейными ограничениями (3.9)—(3.11), позволяет построить метод ее решения.

Процедура решения задачи В представляет собой детализацию схемы ветвей и границ, предложенной для задач дискретного программирования и перенесенной на многоэкстремальные задачи [Лазебник и др., 1981]. Решение исходной задачи В с погрешностью, не превосходящей заданную, сводится к решению конечной последовательности оценочных сетевых распределительных задач выпуклого

программирования. Допустимые множества оценочных задач имеют потоковую структуру множества  $G_B$ , они задаются ограничениями вида (3.9)—(3.11) на сети, совпадающей с исходной сетью  $Y(J, S)$ . Целевые функции оценочных задач формируются как вогнутые оболочки целевой функции задачи В на параллелепипедах, выделяемых ограничениями вида (3.10)–(3.11). Построение таких вогнутых оболочек в силу бисепарабельности функции  $F(X, x)$

сводится к построению конечно-числа вогнутых оболочек функций двух переменных  $f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$  на прямоугольниках вида  $H_s^\omega = \{X_s, x_s^\omega \mid \underline{X}_s \leq X_s \leq \overline{X}_s, \underline{x}_s^\omega \leq x_s^\omega \leq \overline{x}_s^\omega\}$ . В решении выпуклых оценочных задач

используется потоковая структура их допустимых множеств и бисепарабельность целевых функций. Оно осуществляется естественным для таких задач методом групповой координатной оптимизации [D'Esopo, 1959; Райков, 1966], в котором последовательно уточняются переменные - стратегические  $X_B$  и тактические  $x_B$ .

Включение в производственные функции не только величин используемых ресурсов, но и их ориентиров, дает возможность вырабатывать решения, предусматривающие коррекции стратегии управления при всех возможных реализациях неопределенных условий. При этом получают оценки рисков, шансов и их надежностей. Математические модели, позволяющие строить такие стратегии, адаптированные к возможным изменениям условий функционирования производства, получаются более сложными, чем без учета ориентиров, но не настолько, чтобы по ним нельзя было проводить расчеты на современных компьютерах (в том числе персональных). Такой подход к представлению результатов использования ресурсов в экономико-математических моделях представляется перспективным. Он вполне оправдал себя при решении прикладных задач управления водным хозяйством [Богачева и др., 2000].

### 3.6. Оценка эффективности режимов орошения

В обосновании стратегий использования водных ресурсов затраты, связанные с их получением и доставкой, сопоставляются с эффектом от их использования. Сопоставление, осуществляемое в математических моделях, основывается на оценке эффективности использования водных ресурсов производственными функциями (ПФ) - элементов ВХС. При этом ПФ отражают как специфику использования водных ресурсов, так и особенности тех моделей, в которые они включаются.

В данной работе представлена модель построения ПФ оросительных систем (ОС) - характеристик, имеющих самостоятельное значение, а также используемых для формирования целевой функции модели рационального использования водных ресурсов в орошаемом земледелии. В ней учитывается динамика и стохастика потребностей растений в водных ресурсах для включения ПФ в динамические стохастические модели функционирования ВРС. Вегетационный период  $T$  моментами времени  $t=1, 2, \dots, N^T$  делится на интервалы  $T$ , соответствующие продолжи-

тельности фенологических фаз развития растений. Рассматриваются потребности в водных ресурсах, которые используются для формирования урожая в течение этих интервалов в различные исходы водности со из конечного множества  $Q$ .

ПФ рассматриваются как зависимости  $F(X, x)$  эффективности функционирования ОС в течение вегетационного периода от объемов гарантированных  $X$  и используемых  $x$  водных ресурсов, где

$$X = \{X_t | t \in T\}, \text{ а } x = \{x_t^\omega | \omega \in \Omega, t \in T\} -$$

вектор, координаты которого  $x^\omega$  соответствуют объемам воды, подаваемым ОС в течение  $t$ -ых временных интервалов в  $\omega$ -е исходы водности. Подход к построению функций  $F(X, x)$  развивает описанную в [Пряжинская и др., 1983] методологию построения ПФ ОС как функции только одной статической переменной, в которой предполагается, что планируемые и действительные объемы воды, подаваемой в ОС, совпадают и в течение вегетационного периода распределены оптимальным образом.

При построении ПФ ОС учитывается изменчивость условий естественного увлажнения с их вероятностями  $p^\theta$  множества исходов естественного увлажнения путем задания конечного множества  $\Theta$  исходов естественного увлажнения с их вероятностями  $p^\theta$ . Для выделения исходов естественного увлажнения проводится ступенчатая аппроксимация эмпирической кривой обеспеченности дефицитов  $\theta \in \Theta$  соответствуют урожайности сельскохозяйственного увлажнения.

Каждому исходу естественных культур и их поливные нормы.

Предполагается, что процессы поступления воды в речную сеть и потребности растений в ней стохастически независимы, то есть вероятность  $p^{\omega\theta}$

совместного осуществления исходов  $\omega \in \Omega$  и  $\theta \in \Theta$  равна  $p^\omega p^\theta$ . Это предположение для многих ВРС выполнено, так как сток рек формируется, в основном, на большом расстоянии от районов наибольшей потребности в воде для орошения. Формирование стока и его использование для орошения во многих случаях осуществляется в различных климатических условиях. Стохастическая независимость условий водности и естественного увлажнения делает возможной параметрическую декомпозицию задач рационального использования водных ресурсов, при которой каждая ОС характеризуется одной ПФ, учитывающей все исходы водности. Если процессы поступления воды и потребности в ней растений стохастически независимы, то есть  $p^{\omega\theta} = p^\omega p^\theta(\omega)$ , то ОС характеризуется

столькими ПФ, сколько эле-  $\omega \in \Omega$  в этом случае содержит множество  $\Omega$ . Каждому исходу водности соответствует своя ПФ, в построении которой используются модели, рассматриваемые в данной работе; при этом вероятности

$$p^\theta \text{ заменяются на } p^\theta(\omega).$$

Рассматриваются ОС, расположенные в одной агроклиматической зоне, то есть почвенные характеристики, урожайности сельскохозяйственных культур, условия естественного увлажнения, сельскохозяйственные издержки и закупочные цены на производимую продукцию, одинаковы на всей территории, обслуживаемой ОС.

Зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от поливных норм в совокупности временных интервалов описываются нелинейными функциями вида [Коваленко, Меренков, 1972;

$$u_{ij}^{\theta} = \prod_{t \in T} \eta_{ijt}^{\theta}, \quad u_{ij\omega}^{\theta} = \prod_{t \in T} \varepsilon_{ijt\omega}^{\theta}, \quad \text{Галямин, 1981} \quad (3.12)$$

где индексы  $i, j$  и  $\omega$  обозначают соответственно исход естественного увлажнения, исход водности, сельскохозяйственную культуру и способ полива. Способ полива означает неизменную в течение вегетационного периода технологию полива. Возможности поливов сниженными нормами описываются переменными

которые могут принимать значения из диапазона  $[0,1]$ , показывающими  $\eta_{ijt}^{\theta}$  и  $\varepsilon_{ijt\omega}^{\theta}$ ,

где  $\eta_{ijt}^{\theta} = 1$  означает полив полной нормой,  $\eta_{ijt}^{\theta} = 0$  означает его отсутствие,  $\varepsilon_{ijt\omega}^{\theta}$  — значение  $\eta_{ijt}^{\theta}$  при фиксированном  $\omega$ .

Функции  $\eta_{ijt}^{\theta}$  и  $\varepsilon_{ijt\omega}^{\theta}$  описывают гарантированный режим орошения  $\eta_{ijt}^{\theta}$  и  $\varepsilon_{ijt\omega}^{\theta}$  соответствуют реализуемому режиму. Функции зависимости урожайностей сельскохозяйственных культур от гарантированных режимов орошения, функции  $\varphi_{ijt}^{\theta}(\varepsilon_{ijt\omega}^{\theta})$  — от реализуемых режимов при фиксированных значениях гарантированных.

Зависимости  $\varphi_{ijt}^{\theta}$  и  $\varphi_{ijt\omega}^{\theta}$ , описывающие вклады поливов в  $t$ -е временные промежутки в урожайности сельскохозяйственных культур, положительные колоколообразные функции, определённые на всей положительной полуоси [Галямин, 1981]. В данной работе они рассматриваются только на отрезке  $[0;1]$ , так как орошение объёмами водных ресурсов, превышающими полные нормы поливов, снижающими урожайность, нецелесообразно. На этом отрезке функции  $\varphi_{ijt}^{\theta}$  и  $\varphi_{ijt\omega}^{\theta}$  — монотонно возрастающие.

Построение ПФ ОС в виде  $F(X, x)$  осуществляется с использованием рассматриваемой ниже математической модели. В ней с гарантированными объемами  $X_t$  воды, поступающей в ОС, связаны структура посевов сельскохозяйственных культур, проведение подготовительных работ, планирование использования неводных ресурсов и предварительный план поливов. С объемами воды  $x^m$ , подаваемой в ОС, связана коррекция структуры поливов сельскохозяйственных культур при структуре посевов, соответствующей гарантированными объемами.

В обосновании стратегий использования водных ресурсов затраты, связанные с их получением и доставкой, сопоставляются с эффектом от их использования. Сопоставление, осуществляемое в математических моделях, основывается на оценке результатов использования водных ресурсов производственными функциями (ПФ) элементов ВХС. При этом ПФ отражают как специфику использования водных ресурсов, так и особенности тех моделей, в которые они включаются.

В данной работе представлена модель построения ПФ оросительных систем (ОС) - характеристик, имеющих самостоятельное значение, а также используемых

для формирования целевой функции модели рационального использования водных ресурсов в орошаемом земледелии. В ней учитывается динамика и стохастика потребностей растений в водных ресурсах для включения ПФ в динамические стохастические модели функционирования ВХС. Вегетационный период  $T$  моментами времени  $t=1, 2, \dots, N^T$  делится на интервалы  $T_i$ , соответствующие продолжительности фенологических фаз развития растений. Рассматриваются потребности в водных ресурсах, которые используются для формирования урожая в течение этих интервалов в различные исходы водности  $\omega$  из конечного множества  $\Omega$ . Модель построения ПФ ОС описывается задачей  $B(X, x)$  ■ При формировании

допустимого множества  $G_E$  задачи учитывается характер поступления информации об условиях естественного увлажнения. Так как во время сева такой прогноз на период вегетации обычно отсутствует, то структура посевов не должна зависеть от исходов естественного увлажнения, то есть площадь  $y_i$ , занимаемая каждой  $i$ -ой сельскохозяйственной культурой из множества / рассматриваемых в модели культур, одна и та же для всех исходов

$$\theta \in \Theta$$

$$y_i = \sum_j y_{ij}^{\theta'} = \sum_{j \in J} y_{ij}^{\theta''} \quad \theta', \theta'' \in \Theta, \quad (3.13)$$

где  $y_{ij}^{\theta'}$  площадь, занятая  $i$ -й культурой, которая орошается  $j$ -м способом в  $\omega$ -й

исход естественного увлажнения;  $j$  - множество

рассматриваемых

способов по-

лива. Величины площадей

различные значения, то есть структура поливов зависит от условий естественного увлажнения.

Переменные  $y_{ij}^{\theta}$  : имеющие смысл площадей сельскохозяйственного производства, неотрицательны

$$y_{ij}^{\theta} \geq 0, \quad i \in I, j \in J, \theta \in \Theta. \quad (3.14)$$

Их сумма, представляющая собой общую площадь, планируемую под посевы, не превосходит площади  $L$  хозяйств, обслуживаемых данной ОС

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{ij}^{\theta} = \sum_{i \in I} y_i \leq L. \quad (3.15)$$

При планировании сельскохозяйственного производства необходимо соблюдать основные севооборотные закономерности. Это требование в модели задается в виде ограничений на планируемую структуру производства сельскохозяйственной продукции

$$\underline{\alpha}_i L^{\theta} \leq \sum_{j \in J} y_{ij}^{\theta} \leq \bar{\alpha}_i L^{\theta}, \quad i \in I, \theta \in \Theta.$$

В неравенствах (16) символом

$$L^{\theta} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{ij}^{\theta} \quad \text{обозначены орошаемые } \bar{\alpha}_i \text{ и } \underline{\alpha}_i \text{ площади}$$

Неотрицательные коэффициенты  $\bar{\alpha}_i$  и  $\underline{\alpha}_i$  в неравенствах (3.16) характеризуют верхнюю и нижнюю границы содержания  $i$ -й культуры в посевах на

орошаемой площади. Верхние границы соответствуют коэффициентам предельного насыщения культуры в севообороте. Нижние границы, наряду с возможностями севооборота, неявно учитывают также требования к минимальному объему выпускаемой сельскохозяйственной продукции.

Условия использования гарантированных объемов водных ресурсов задаются неравенствами

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \eta_{ijt}^{\theta} a_{ijt}^{\theta} y_{ij}^{\theta} \leq \gamma X_t, \quad t \in T, \quad (3.17)$$

в которых  $a_{ijt}^{\theta}$

- полная поливная норма  $g$ -й культуры в  $t$ -ый временном интервале в  $\#$ -й исход естественного увлажнения при  $j$ -м способе полива,  $X_t$  - гарантированный объем водных ресурсов, поступающих в ОС в  $t$ -м временном интервале,  $\gamma$  — коэффициент полезного действия ОС.

Использование реализуемых объемов водных ресурсов, поступающих в ОС, удовлетворяет ограничениям

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \epsilon_{ijt}^{\theta\omega} a_{ijt}^{\theta} y_{ij}^{\theta} \leq \gamma X_t^{\omega}, \quad (3.18)$$

аналогичным (3.17).

В задаче  $B(X, x)$  могут быть учтены условия, отражающие ограниченность трудовых, финансовых и материальных ресурсов, а также задания по выпуску продукции. Эти условия выделяются ограничениями на ресурсы в оросительной сети

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} m_{ijd}^{\theta} y_{ij}^{\theta} \leq M_d^{\theta} \quad d \in D, \quad \theta \in \Theta, \quad (3.19)$$

где  $M_d^{\theta}$  — общее количество планируемого ресурса  $d$ -го вида;  $D$  — множество учитываемых видов ресурсов;  $m_{ijd}^{\theta}$  — нормативы удельных затрат планируемых ресурсов.

При рассмотрении выпуска продукции величины  $M_d^{\theta}$  имеют смысл задания по выпуску, а  $m_{ijd}^{\theta}$  — удельных норм выхода; в этом случае знак неравенства в (3.19) меняется на обратный. Ограниченность ресурсов, используемых при поливах, задается ограничениями

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} m_{ijdt}^{\theta} \eta_{ijt}^{\theta} y_{ij}^{\theta} \leq M_{dt}^{\omega}, \quad d \in D, \theta \in \Theta, t \in T, \quad (3.20)$$

Целевой функционал задачи  $B(X, x)$  описывает критерий эффективности функционирования ОС - математическое ожидание дополнительной прибыли (ДП), получаемой за счет орошения. ДП определяется следующим образом - из прибыли, получаемой при орошении на землях, обслуживаемых ОС, вычитается прибыль, которая может быть получена на тех же землях при богарном земледелии. При этом предполагается, что как на богарных, так и на поливных землях производство организовано оптимальным образом. Математическое ожидание ДП включает следующие слагаемые:

$$\bar{f}(y, \eta, \varepsilon) = \pi(y, \eta) + \delta(y, \eta, \varepsilon) - h_k - h_s - h_c, \quad (3.22)$$

где  $\pi(y, \eta)$  - математическое ожидание прибыли, получаемой с полей, обслуживаемых ОС, за счет использования гарантированного объемов воды;  $\delta(y, \eta, \varepsilon)$  - математическое ожидание приращения прибыли, вызванного отклонением объемов воды, поступающей в ОС, от гарантированных значений;  $f_r$  - приведенные затраты в ОС, не зависящие от режимов ее функционирования;  $h_s$  - наибольшее значение математического ожидания прибыли, которая может быть получена с полей ОС при богарном способе производства продукции;  $h$  - наибольшее значение математического ожидания прибыли, которая могла быть получена на землях, отчужденных под оросительную сеть, при богарном производстве.

Математическое ожидание прибыли от использования гарантированных объемов воды описывается функцией

$$\pi(y, \eta) = \sum_{\theta \in \Theta} p^\theta \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^\theta y_{ij}^\theta, \quad (3.23)$$

где  $c_{ij}^\theta$  - прибыль, получаемая с единицы площади, засеянной  $i$ -й культурой, в  $\theta$ -й исход естественного увлажнения, орошаемой  $j$ -м способом. Она вычисляется по формуле

$$c_{ij}^\theta = e_i u_{ij}^\theta - z_{ij}^\theta, \quad (3.24)$$

где  $e$  - закупочная цена единицы  $i$ -й продукции;  $u_{ij}^\theta$  и  $z_{ij}^\theta$  соответственно урожайность и удельные издержки производства  $i$ -й продукции при  $\theta$ -м способе орошения в  $\theta$ -й исход естественного увлажнения. Входящие в формулу (3.24) урожайности сельскохозяйственных культур  $u_{ij}^\theta$  определяются равенствами (3.12).

Таким образом,

$$\pi(y, \eta) = \sum_{\theta \in \Theta} p^\theta \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[ e_i \prod_{t \in T} \varphi_{ijt}^\theta (\eta_{ijt}^\theta) - z_{ij}^\theta \right] y_{ij}^\theta. \quad (3.25)$$

Математическое ожидание приращения прибыли, вызванное отклонением реализуемых режимов подачи водных ресурсов от гарантированных, описывается в виде

$$\delta(y, \eta, \varepsilon) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{\theta \in \Theta} p^\theta \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^{\theta\omega} y_{ij}^\theta, \quad (3.26)$$

$c_{ij}^{\theta\omega}$  удельные приращения прибыли при отклонении режимов подачи вод-

где

$c_{ij}^{\theta\omega}$  вычисляются по формуле

$$c_{ij}^{\theta\omega} = e_i (u_{ij}^{\theta\omega} - u_{ij\eta}^{\theta}) - \Delta z_{ij}^{\theta\omega} - \lambda_i^{\theta\omega}, \quad (3.27)$$

штраф за недополучение продукции, связанные с переходом от гарантиро  $\lambda_i^{\theta\omega}$  ого режима орошения к реализуемому. При подстановке соотношений (3.12) в формулу (3.27) и формулы (3.27) в выражение (3.26) математическое ожидание приращения прибыли, вызванное отклонением реализуемых режимов орошения от гарантированных, принимает вид:

$$\delta(y, \eta, \varepsilon) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{\theta \in \Theta} p^{\theta} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} [e_i \left[ \prod_{t \in T} \varphi_{ijt}^{\theta}(\eta_{ijt}^{\theta}) - \prod_{t \in T} \varphi_{ijt\eta}^{\theta}(\varepsilon_{ijt}^{\theta\omega}) \right] - \Delta z_{ij}^{\theta\omega} - \lambda_i^{\theta\omega}] y_{ij}^{\theta}. \quad (3.28)$$

При переходе от запланированного орошения с большими оросительными нормами к реализуемому орошению меньшими нормами, в частности, к богарному производству, урожайности сельскохозяйственных культур снижаются

В этом случае издержки практически не изменяются, так как они связа-  
 $u_{ik}^{\theta} < u_{ij}^{\theta}$ .

ны, в основном, с планируемыми способами поливов. Без изменения остаются плата за ресурсы и оборудование, общехозяйственные расходы и расходы на семена, вносимые до подачи воды в ОС и рассчитанные на гарантированный режим водных ресурсов; они составляют не менее 50 % всех издержек. Оплата труда, которая составляет 30-40 % издержек, либо остается без изменений, либо незначительно уменьшается - не более, чем на 10 %, что составляет не более, чем 4 % от общей суммы издержек. Остальные затраты, включающие расходы на горюче-смазочные материалы и удобрения, величина которых не превосходит 20 % всех издержек, уменьшаются не более, чем на 30 %, что соответствует не более 6 % всех издержек, т.е. суммарные издержки могут уменьшаться не более, чем на  $\Delta z_{ij}^{\theta\omega} = 0$ . Поэтому можно принять

продукции, вызванное снижением урожайности,  $\lambda_{ij}^{\theta\omega} \geq 0$ . Возможный штраф за недополучение

Поэтому сравнение выражений (3.27) и (3.24) для случая перехода от больших запланированных к меньшим реализуемым оросительным нормам приводит к неравенствам

$$c_{ij}^{\theta\omega} + c_{ij}^{\theta} \leq c_{ik}^{\theta}. \quad (3.29)$$

К этим же неравенствам приводит сравнение (3.27) и (3.24) при переходе от запланированного орошения с меньшими оросительными нормами к реализуемому орошению большими оросительными нормами.

В этом случае урожайности  $\lambda_{ij}^{\theta\omega} = 0$ ; сельскохозяйственных культур несколько повышаются, штраф издержки внепланового орошения значительно увеличиваются, так как они связаны с текущими затратами, необходимыми для коррекции ранее принятого решения.

Неравенства (3.29) показывают целесообразность планирования, наряду со структурой посевов, структуры их поливов, а также учета их возможной коррекции.

Слагаемые  $h$ , целевого функционала (3.22) включают приведенные затраты на реконструкцию и строительство мелиоративной сети и подготовку земель к орошению, а также затраты на поддержание ОС в работоспособном состоянии. Они не зависят от режимов орошения.

Значения слагаемых  $i$  и  $j$  в функционале (3.22), равных максимуму математического ожидания прибыли, которая может быть получена при богарном способе производства на полях, обслуживаемых ОС и занятых оросительной сетью (их площади соответственно равны  $L$  и  $L_c$ ), могут быть определены в результате решения задачи А - частного случая задачи  $B(X, x)$ . Задача А состоит в максимизации функции  $ft(y, rj)$  на множестве  $G_A$ , выделяемом ограничениями (3.2)-(3.5), (3.8), в которых рассматривается только богарный способ производства. Значения гарантированных объемов воды полагаются равными нулю и отклонения от него отсутствуют. В качестве площади ОС в задаче А выступают величины  $L$  (при вычислении  $ft$ ) и  $L_c$  (при вычислении  $h$ ). Они также не зависят от режимов орошения.

В целевую функцию  $<p(y, z, s)$  задачи  $B(X, x)$  включены только слагаемые

$$m\mathcal{L}y, \quad \tau t) \quad \text{и} \quad \partial(y, \quad n, \mathcal{L}), \quad \text{зависящие от}$$

$$-\sum_{\theta \in \Theta} p^\theta \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_{ij}^\theta \left[ z_{ij}^\theta + \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \left[ \Delta z_{ij}^{\theta\omega} + \lambda_i^{\theta\omega} \right] \right] \cdot \left[ 2 \prod_{t \in T} \varphi_{ijt}^\theta (\eta_{ijt}) - \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \prod_{t \in T} \varphi_{ijt}^\theta (\varepsilon_{ijt}^{\theta\omega}) \right] -$$

переменных задачи и влияющие на её решение,

(3.30)

Задача  $БЮ, a)$  состоит в определении

вектора  $y, u, a$  с составляющими: вектор  $y = \{y_{ij}^\theta \mid i \in I, j \in J, \theta \in \Theta\}$ ,

вектором площадей сельскохозяйственных культур

векто-

ром планируемых норм полива  $\eta = \{\eta_{ijt}^\theta \mid i \in I, j \in J, \theta \in \Theta, t \in T\}$  и вектором реали-

зуемых норм полива  $\varepsilon = \{\varepsilon_{ijt}^{\theta\omega} \mid i \in I, j \in J, \theta \in \Theta, \omega \in \Omega, t \in T\}$ . Вектор  $y, rj, s$  максимизирует функцию

(3.30) на множестве  $GE$ , выделяемом ограничениями (3.12)-(3.21).

Формирование функции  $F(X, x)$  осуществляется в результате решения конечного числа задач  $B(X, x)$ , при параметрическом изменении вектора  $X, x$  из  $[0, 0, \bar{X}, \bar{x}]$ .

Значение каждой из решаемых за-

диапазона его возможных значений

задач определяет  $F(X, x)$  в одной точке. Значения  $F(X, x)$ , полученные для конечного множества точек  $X, x$ , распространяются на весь диапазон определения ПФ при помощи линейной интерполяции, узлами которой служат точки  $X, x$  с вычисленными в них значениями  $F(X, x)$ .

При

построении ПФ ОС, оценивающей

$$N = N^Q \prod_{\omega \in \Omega} N^\omega \prod_{t \in T} N^T \quad \text{эффективность режимов орошения,}$$

задач  $B(X, x)$ , каждая из которых соответ-

требуется решить

ствуется одному набору параметров  $1/n$ . Задачи  $B(X, x)$  - многоэкстремальные. В них максимизируется  $(2N^r + 1)$  - сепарабельная невыпуклая функция (3.30) на невыпуклом множестве, в выделении которого, наряду с линейными ограничениями (3.13)—(3.16) и (3.19), присутствуют 2-сепарабельные (3.17), (3.18), (3.20) и 3-сепарабельные (3.21) нелинейные условия. Их решение может быть получено в результате итерационного процесса, реализующего схему ветвей и границ, описанную в [Лазебник и др., 1981]. Такое значительное увеличение числа решаемых задач и их существенное усложнение приводит к резкому возрастанию трудоёмкости построения ПФ ОС по сравнению с линейной моделью  $A(X, x)$ , описанной в [Левитина и др., 1990] для построения ПФ ОС в статической постановке. Поэтому целесообразно так же, как это сделано в [Левитина и др., 1990], аппроксимировать задачу  $B(X, x)$  двумя последовательно решаемыми задачами  $B^{\wedge}(X)$  и  $B^{\wedge}(X, x)$ . Основной проводимой аппроксимации является блочная структура задачи  $B(X, x)$ .

На первом шаге при параметрическом изменении гарантированного водопользования  $X$  от 0 до  $X$  для всех  $t \in T$  решаются задачи  $B^j(X)$ , состоящие в максимизации функции  $f(y, r, f)$ , описываемой равенством (3.25) на множестве  $G_{Ei}(X)$ , выделяемом ограничениями (3.13)—(3.17), (3.19) и (3.20). В результате решения этой задачи определяются функции использования гарантированных объёмов водных ресурсов  $F(X, X)$ , площади посевов сельскохозяйственных культур  $X_j(X)$ , планируемые площади поливов

$$\eta_{ijt}^{\theta}(X) \cdot y_{ij}^{\theta}(X)$$

и планируемые поливные нормы

равенством (3.28) функция  $y_i(X), y_{ij}^{\theta}(X), \eta_{ijt}^{\theta}(X)$  фиксируется. Решается  $B_{ij}(X, x)$ , полученное на первом шаге,

подстановке в неё решения задачи  $B^{\wedge}(X)$ . В ней максимизируется определяемая задача

$$\delta v(X, \eta(X), \varepsilon)$$

выделяемом ограничениями (3.18) и (3.21) с фиксированными в них значениями  $\varepsilon_{ijt}^{\theta\omega}$ , которая получается из переменных задачи  $B(X, x)$  при

на множестве  $G_{Ei}(X, x)$ , планируемые поливные нормы  $v_{ijt}^{\theta}(X)$ . В  $\varepsilon_{ijt}^{\theta\omega}(X, x)$  переменных

и математическое ожидание приращения прибыли  $\delta v(X, \eta(X), \varepsilon(X, x))$ , обусловленное отклонением реализуемых режимов орошения от гарантированных.

Задачи  $E_j(X)$  - многоэкстремальные. В них максимизируются  $(N + 1)$ -сепарабельные невыпуклые функции  $f(y, r, f)$  на множествах  $G_{Ei}(X)$ , выделяемых, наряду с линейными ограничениями (3.13)—(3.16), (3.19), билинейными ограничениями (3.17) и (3.20), порождающими невыпуклость множеств  $G_{Ei}(X)$ . Для решения задач  $BAX$  по описанной в [Лазебник и др., 1981] схеме ветвей и границ нелинейные положительные слагаемые целевой функции представляются в виде

$$e_i y_{ij}^{\theta} \prod_{t \in T} \varphi_{ijt}^{\theta}(\eta_{ijt}^{\theta}) = e_i \cdot \exp \left[ \ln x_{ij}^{\theta} + \sum_{t \in T} \ln \varphi_{ijt}^{\theta}(\eta_{ijt}^{\theta}) \right].$$

Строятся выпуклые оболочки  $\underset{H_{y_{ij}}^\theta}{CO} \ln y_{ij}^\theta$  и  $\underset{H_{\eta_{ijt}}^\theta}{CO} \ln \varphi_{ijt}^\theta(\eta_{ijt}^\theta)$  функций  $\ln y_{ij}^\theta$  и  $\ln \varphi_{ijt}^\theta(\eta_{ijt}^\theta)$  на множествах  $H_{y_{ij}}^\theta = \{y_{ij}^\theta \mid \underline{\alpha}_i L \leq y_{ij}^\theta \leq \bar{\alpha}_i L\}$  и  $H_{\eta_{ijt}}^\theta = \{\eta_{ijt}^\theta \mid 0 \leq \eta_{ijt}^\theta \leq 1\}$ .  
Также строятся

выпуклые оболочки функций, которыми задаются ограничения

$$(3.17) \text{ и } (3.19), \text{ на двумерных прямоугольниках } H_{y_{\eta_{ijt}}^\theta} = H_{y_{ij}}^\theta \oplus H_{\eta_{ijt}}^\theta$$

Затем делением этих множеств по правилам, описанным в [Лазебник и др., 1981], находятся векторы, на которых ограничения нарушаются в заданных пределах. Значения целевой функции на этих векторах-решениях отличаются от оптимальных не более чем на заданную погрешность.

Задачи  $B_{ij}(X, x)$  - линейные. Они могут быть решены применением любой стандартной программы линейного программирования.

Заметим, что при построении ПФ ОС в результате решения серии двухэтапных задач стохастического нелинейного программирования  $B(X, x)$  вместе с функцией  $F(X, x)$  определяются оптимальные структуры посевов, описываемые стратегическими переменными - площадями посевов  $y_{ij}^\theta$ , " оптимальные структуры поливов, описываемые тактическими переменными - функциями поливов в гарантируемых  $\eta_{ijt}^\theta$  и реализуемых  $\varepsilon_{ijt}^{\theta\omega}$  режимах.

### 3.7. Влияние страхования рисков водопользования на управление ВХС

Необходимость принятия детерминированных решений о параметрах и режимах ВХС в стохастических условиях связана с риском снижения эффективности использования водных ресурсов из-за возможного несоответствия условий функционирования принятым решениям об их режимах. Наличие риска естественным образом порождает желание пользователей - равноправных участников рынка - его застраховать для обеспечения более устойчивого, без резких срывов, функционирования в результате возмещения части понесённого ущерба. При этом число пользователей, у которых дефицит водных ресурсов приводит к потере эффективности функционирования (ущербу), всегда меньше числа опасующихся наступления этого негативного события. Таким образом, наряду с органом управления ВХС (центром) и пользователями, появляется ещё один участник - страховщик (страховая компания) - «защитник» от отрицательных последствий дефицита водных ресурсов, влияющий на распределение водных ресурсов изменением функций эффективности пользователей. Возникает необходимость в анализе характера этого влияния, который проводится на примере использования водных ресурсов в орошаемом земледелии Терско-Кумского региона.

Для того, чтобы система страховой защиты оказалась жизнеспособной, необходимо, чтобы она соответствовала нескольким обязательным требованиям.

С одной стороны, страхование выгодно государству, страхователям (отрасли экономики, отдельные предприятия, физические лица) и страховщикам - это их бизнес. С другой стороны, страхование как экономическая категория, подчиняется

объективным экономическим законам. Оно может быть успешным только в том случае, когда удастся соблюсти баланс между, казалось бы, противоречащими интересами страхователя и страховщика. А именно:

- для страхователя страховая премия является одним из компонентов производственных затрат; наличие этой компоненты не должно переводить рентабельность производства в отрицательную область;
- деятельность страховщика также не должна быть убыточна; собранной премии должно хватать на страховые выплаты.

Возникает необходимость в анализе влияния взаимодействия страховщика со страхователями - пользователями на управление водными ресурсами. В качестве страховщика могут быть общества взаимного страхования, государственные страховые организации, акционерные общества, выступающие самостоятельно или объединенные для организации перестрахования и сострахования. Предполагается, что резервы страховщика достаточны для обеспечения страховых возмещений. Пользователь получает прибыль от использования водных ресурсов, выплачивает страховую премию (страховой взнос) за предоставление страховой защиты и, если случается страховой случай - снижение размеров прибыли, обусловленное дефицитом водных ресурсов, - страховщик выплачивает ему страховое возмещение (страховую сумму). Целевая функция пользователя, описанная в разделе 3.3, принимает вид

$$\bar{F}_s(X_s, x_s) = f_s(X_s, x_s) - A_s(X_s, x_s) + B_s(X_s, x_s), \quad (3.31)$$

где  $A_s(X_s, x_s)$  - страховой взнос,  $B_s(X_s, x_s) = \sum p^\omega B_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$  - математическое ожидание страховой суммы.

Страховая премия составляет часть риска

$$A_s(X_s, x_s) = \alpha(R) \cdot R_s(X_s, x_s)$$

со страховым тарифом  $\alpha(R)$  -- неубывающей функцией риска со значениями в пределах  $1 > \alpha(R) > 0$ . В данной работе страховой тариф предполагается единым для всех пользователей.

Страховая сумма возмещает только часть ущерба от недодачи водных ресурсов, чтобы поощрять пользователя производить продукцию

$$B_s^\omega(X_s, x_s^\omega) = \beta(r^\omega) r_s^\omega(X_s, x_s^\omega).$$

Норматив страхового возмещения  $\beta(r^\omega)$  представляет собой невозрастающую функцию ущерба со значениями,  $1 > \beta(r^\omega) > 0$ . В данной работе он принят единым для всех пользователей.

мещения  $\beta(r^\omega)$  выбираются такими, чтобы были выполнены условия

Соотношения между страховым тарифом  $\alpha(R)$  и нормативом страхового воз-

$$A_s(X_s, x_s) \geq B_s(X_s, x_s), \quad (3.32) \quad (3.33)$$

$A_s(X_s, x_s) < \max_{\omega \in \Omega} B_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$ . Условие (3.32) означает, что страховой взнос должен обеспечивать покрытие расходов, связанных с возмещением ущерба вследствие страховых случаев, и на-

грузки, предназначенной для покрытия расходов, связанных со страхованием. Его нарушение означает невыгодность страхования для страховщика. Выполнение условия (3.33) делает страхование привлекательным для страхователя - снижается его риск; при этом страховое возмещение  $A_s(X_s, x_s)$  наибольшего ущерба превосходит страховую взнос  $B_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$  в несколько раз меньше наибольшей величины страхового возмещения  $\max_{\omega \in \Omega} B_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$  [Бурков, Новиков, 1997; Штрауб, 1994].

При назначении страховых тарифов и нормативов страхового возмещения учитывается также отношение страхователей к достижению компромисса между возможностью использовать шанс повысить прибыль и риском, связанным с надеждой на такой шанс (более высокая ожидаемая прибыль предопределяет значительно больший риск). Условно людей и, следовательно, организации - страхователей, управляемых людьми, можно разделить на три группы. К первой группе относятся те, кто не склонен к риску. При прочих равных условиях они предпочитают меньший разброс возможных исходов. Вторую группу составляют нейтрально относящиеся к риску. Им безразличен выбор между определенной и неопределенной ожидаемой прибылью. Третью группу образуют любители риска, предпочитающие неопределенную прибыль определенной. Водопользователи стремятся к повышению надежности гарантированного количества ресурсов. Они отнесены к первой группе страхователей. Страховщики, как правило, нейтральны. Страховые компании, обслуживающие большое число страхователей, могут рассчитывать на то, что собранные страховые премии будут не меньше страховых выплат.

Вообще говоря, условия (3.32) и (3.33) могут оказаться несовместными. Поэтому потребовалось на примере конкретных ВХС убедиться в  $\alpha(R)$  и  $\beta(r^\omega)$ , существовании коэффициентов

обеспечивающих выполнение этих условий. Непротиворечивость условий (3.32) и (3.33) анализируется в рамках представленной в разделе 3.5 математической модели В. В ней рассматривается обоснование параметров и режимов ВХС при рассмотрении страхования рисков водопользования в Терско-Кумском регионе (ТКР).

В ВХС ТКР потенциальными страхователями выступают хозяйства сельскохозяйственного производства, обслуживаемые 66 оросительными системами (ОС) и объединённые в 66 пользователей. В результате анализа потребностей ОС региона в водных ресурсах, возможностей их удовлетворения и производственных функций (ПФ) ОС были определены страховой тариф в виде постоянного коэф-

фициента  $\alpha(R)$  и  $\beta(r^\omega)$  со значениями от 0,27 до 0,24. Полученные значения  $\alpha$  и  $\beta(r^\omega)$  обеспечивают выполнение условий (3.32) и (3.33) для всех 66 оросительных систем региона. В частности, для Терско-Кумской ОС наибольший ущерб  $r_{15}^{\omega \max} = 106$  млн руб. и наибольшее значение риска  $R_{15}^{\max} = 22$  млн руб., полученное для всех вариантов задачи В, гарантируют выполнение условия (3.14) со страховым взносом  $A_{15}(X_{15}, x_{15}) = 0,27 \cdot 22 = 5,94$  млн руб. и страховым возмещением  $B_{15}^{\max}(X_{15}, x_{15}) = 0,24 \cdot 106 = 25,4$  млн руб.

коэффициента  $a(R) = a = 0,27$  и норматив страхового возмещения как монотонно убы-

Рассматривается распределение водных ресурсов в орошаемом земледелии ТКР, моделируемое задачей В. Основу оценки эффективности использования водных ресурсов составляют те же производственные функции, которыми оценивалась эффективность оросительных систем в работе [Богачева и др., 2000]. Сеть задачи В та же, что в [Богачева и др., 2000]. Она содержит 28 вершин, соединённых 103 дугами, включающими 66 дуг, изображающих

оросительные системы. Множество стохастических условий ми стока рек региона.  $r_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0})$  всех 66 поль-

зователей ВРС ТКР и связанные с этим риски  $R_s(X_s^0, x_s^0)$ . По полученным значе-

$$r_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0})$$

$$R_s(X_s^0, x_s^0)$$

в результате решения задачи определены и рисков ущерба

в соответствии с правилом (3.31) сформированы оценки прибыли, получаемой с орошаемых полей при страховании  $F_s^1(X_s, x_s)$

Решена задача В, в ко- рисков водопользования - целевые функции пользователей прибыль увеличилась  $X_s, x_s$  заменены на  $F_s^1(X_s, x_s)$ , её оптимальный вектор  $X(F_s^1(X_s^1, x_s^1) < f_s(X_s^0, x_s^0))$  чением значений гарантированного водопользования  $X_s^1$  по сравнению с  $X_s^0 (X_s^1 \geq X_s^0)$  снижением его надёжности  $(P_s^1 \leq P_s^0)$  и увеличением риска  $(R_s(X_s^1, x_s^1) \geq R_s(X_s^0, x_s^0))$  для всех  $s \in S$ . У части

$$(F_s^1(X_s^1, x_s^1) > f_s(X_s^0, x_s^0))$$

уменьшилась

у другой части -

суммарная - практически не изменилась (уменьшилась с 493 до 492 млн руб.).

Значения страхового взноса  $A_s(X_s, x_s)$  и страхового возмещения  $B_s(X_s, x_s)$ , участвующие в формировании функций  $F_s(X_s, x_s)$ , соответствуют рискам и ущербам, определенным по оптимальному вектору  $X^0, x^0$ . Вектору  $X^x, x^x$  соответствуют другие величины рисков и ущербов. Требуется преобразование целевых функций в  $F^2(X_s, x_s)$ , формируемых по вектору  $X^x, x^x$ , и новое решение задачи В и затем формирование функций  $F^3(X_s, x_s)$  по вектору  $X^2, x^2$  и т.д. То есть требуется организовать итерационный процесс, в результате которого будет получен оптимальный план распределения водных ресурсов с учетом возможного страхования рисков, связанных с их использованием.

Проведены три таких процесса: один соответствует обязательному страхованию (а) и два - добровольному (б) и (в).

(а) Целевые функции всех водопользователей преобразуются по правилу (3.31). Вначале при переходе от итерации к итерации наблюдается перераспределение водных ресурсов и прибыли между пользователями, приводящее к снижению суммарной прибыли с 493 до 460 млн руб. Начиная с шестого шага, процесс принимает колебательный характер в зависимости от соотношений между страховым взносом и страховым возмещением на очередном этапе. Прибыль колеблется в пределах от 460 до 462 млн руб. Эти колебания находятся в пределах погрешностей исходных данных. Итерационный процесс не сходится.

(б) Выделяются пользователи, у которых при переходе от целевой функции  $F_s^1(X_s^1, x_s^1) \leq f_s(X_s, x_s)$  к  $F_s^1(X_s^1, x_s^1)$  значение прибыли не увеличилось, то есть  $X_s^0, x_s^0$ . Для них потоки фиксируются и принимаются равными  $F_s^1(X_s, x_s)$  к  $F_s^2(X_s, x_s)$  по остальным пользователям

осуществляется переход от правилу (3.31) и решается задача В с новыми целевыми функциями. Переход к последующим итерациям аналогичен. На каждой итерации происходит увеличение прибыли хотя бы у одного пользователя при фиксированной прибыли остальных. Процесс сходится за конечное число шагов. В результате суммарная прибыль увеличилась с 493 до 499 млн руб.

(в) Итерационный процесс перераспределения водных ресурсов отличается от итерационного процесса (б) только тем, что у выделенных пользователей фиксируются целевые функции предыдущей итерации, а не потоки, как в случае (б). Процесс также сходится. Величина суммарной прибыли незначительно увеличилась, она составила 494 млн руб.

Все три варианта характеризуются увеличением риска всех оросительных систем, ростом их гарантированного водопользования и снижением его надёжности. Суммарный риск увеличился с 51 млн руб. в случае (а) до 126 млн руб., в случае (б) - до 111 млн руб. и в случае (в) - до 106 млн руб. Гарантированная отдача ВХС ТКР (суммарное гарантированное водопользование) возросла с 3763 млн м<sup>3</sup> в случае (а) до 6765 млн м<sup>3</sup>, в случае (б) - до 5181 млн м<sup>3</sup> и в случае (в) - до 5049 млн м<sup>3</sup>. При этом надёжности гарантированных объёмов водопользования снизились во всех случаях. Проявившаяся тенденция увеличения значений гарантированного водопользования, снижения его надёжности и увеличения риска объясняется компенсацией ущербов при наступлении страховых случаев и вогнутость нелинейных функций  $f_s(X_s, x_s)$ , которыми оценивается эффективность использования водных ресурсов. Соотношения между нормированными значениями суммарной прибыли, риска и гарантированной отдачи иллюстрирует рис. 3.3.

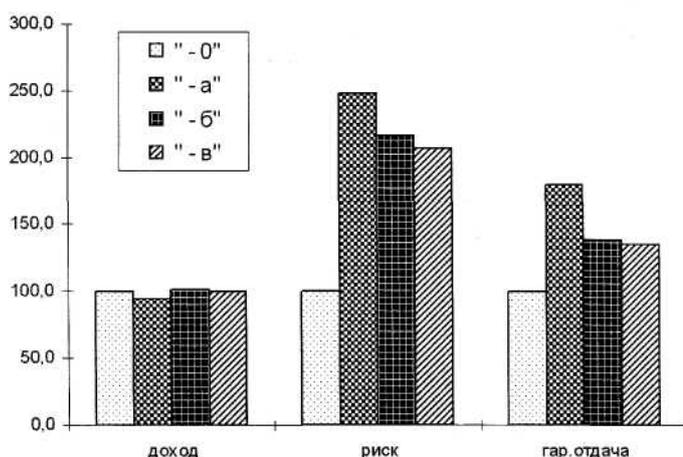


Рис. 3.3. Соотношения между показателями оптимального водопользования ВХС ТКР при различных вариантах страхования

Из рассмотренных вариантов следует предпочтительность добровольного страхования орошаемого земледелия Терско-Кумского региона. Из вариантов добровольного страхования (б) и (в) более предпочтительным является вариант (б), в котором на каждом шаге итерационного процесса распределения водных ресурсов достигнутый результат либо улучшается, либо закрепляется.

Влияние страхования риска водопользования на распределение водных ресурсов в ВХС, функционирующих в условиях, отличающихся от рассмотренных и включающих водопользователей другой физической природы, при других механизмах страхования, а также при более подробном рассмотрении функционирования и развития ВХС, ещё предстоит выяснить.

### 3.8. Заключение

Представлен подход к выработке стратегий управления ВХС в условиях неопределённости. Методологической основой подхода является учёт, наряду с объёмами реальных водных ресурсов, их ориентиров (гарантированных значений), которые выступают как виртуальные ресурсы, влияющие на хозяйственную деятельность ВХС и смежных с нею систем. В рамках этого подхода появилась возможность оценивать эффективность, риски, шансы и надёжность водопользования, а также вырабатывать стратегии управления, адаптируемые к возможным условиям функционирования ВХС. Оценки этих показателей содержатся в описываемых двухэтапными задачами математического программирования математических моделях оптимального функционирования ВХС, особенностью которых являются переменные, соответствующие как объёмам водных ресурсов, так и их ориентирам. Расширение ранее рассматриваемых математических моделей рационального использования водных ресурсов, оперирующих только реальными величинами объёмов, при включении в них ориентиров не нарушает их структуру, логичность и наглядность формализованного представления проблемы. Формирование зависимостей, связывающих реальные объёмы водных ресурсов и их ориентиры (основные из них - производственные функции), для включения в математические модели не вызывает затруднений.

## Глава 4

# ОБОСНОВАНИЕ ДОЛГОСРОЧНЫХ СТРАТЕГИЙ РАЦИОНАЛЬНОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

### 4.1. Введение

Подход к составлению долгосрочных планов развития ВХС опирается на теорию управления системами, оперирующую как текущими поставками водных ресурсов, так и их гарантированными значениями. В основе предлагаемой методологии - комплекс математических моделей, в рамках которого стратегии сравниваются, отбраковываются и выделяются рациональные. Разработка долгосрочных стратегий управления ВХС с использованием предлагаемого комплекса моделей предполагает участие в этом процессе лиц, принимающих решение (ЛПР). ЛПР формируют сценарии развития регионов и определяют соответствующие им требования к расходам и объёмам водных ресурсов, анализируют решения, получаемые в математических моделях, корректируют сценарии и требования к водным ресурсам.

В представленных моделях структуризация и уровень агрегирования ВХС соответствуют цели моделирования - выработке стратегий развития на длительную перспективу, инвариантных по отношению к изменению внешних условий (учитывающих все сформированные сценарии развития с их вероятностями и допускающих корректировку по мере реализации этих сценариев). Подробность описания в моделях элементов и процессов в ВХС соответствует полноте и точности доступной информации, которая при перспективном планировании не может быть ни полной, ни точной. Поэтому для наглядности и «прозрачности» представления проблемы рационального использования водных ресурсов осуществляется максимальное упрощение моделей. Это позволяет оценивать исходные данные в интерактивном режиме, осмысливать вносимые упрощения, анализировать получаемые решения и, при необходимости, преобразовывать модели. Получаемые приближенные решения соответствуют принятому уровню агрегирования.

Особенностью предлагаемых моделей является включение, наряду с переменными, изображающими реальные поставки водных ресурсов, ориентиров, то есть переменных, соответствующих гарантированным значениям поставок (условность использования слова *гарантированный* в данном случае отмечена выше, см. главу 3, раздел 3.2). Модели описываются двухэтапными задачами стохастиче-

ческого программирования. Стратегические переменные первого этапа  $X$ , выбираемые при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, - это ориентиры, гарантированные значения объёмов и расходов водных ресурсов. Тактические переменные второго этапа  $X^0$ , выбираемые при известных реализациях  $\Omega$

стохастических условий  $\omega$ , множество которых предполагается конечным, соответствуют поставляемым объёмам и расходам водных ресурсов. Целевые функции  $f(X, x)$  этих задач оценивают экономический результат использования водных ресурсов, который зависит как от текущих поставок водных ресурсов, так и от намеченных ориентиров. В результате решений, получаемых в моделях, оп-

ределяются оптимальные стратегии  $X^0$  и их тактические вариации  $x^{\omega 0}$  при различных реализациях стохастических условий. Решения соответствующих двойственных задач дают оптимальные экономические оценки дополнительных единиц

используемых водных ресурсов  $c_x^{\omega 0}$

и их ориентиров (гарантированных значений)

В решениях задач оптимизации, которыми представлены модели, неявным образом  $c_x^0$

содержатся оптимальные значения надёжности гарантированного водопользования  $P$ . Кроме того, побочным эффектом присутствия в модели переменных, соответствующих текущим поставкам и их гарантированным величинам, являются оптимальные оценки рисков снижения эффективности водопользования  $R(X^0, x^0)$  из-за неполного (по сравнению с гарантированным значением) поступления водных ресурсов и шанс её повышения  $D(X^0, x^0)$  при получении дополнительного (относительно гарантированного значения) количества водных ресурсов.

#### 4.2. Водопользование в бассейнах Волги и Кубани

Комплекс моделей иллюстрируется на примере ВХС бассейнов рек Волги и Кубани. Бассейн Волги охватывает полностью или частично 39 субъектов Российской Федерации, относящихся к пяти федеральным округам. Водопользование в бассейне р. Кубани осуществляется четырьмя субъектами Федерации, расположенными в Южном федеральном округе. Несмотря на различные масштабы ВХС, методология выработки стратегий их развития на длительную перспективу и комплекс математических моделей, её отражающих, - одни и те же. Различно только наполнение моделей исходной информацией о структуре, параметрах, сценариях развития и условиях функционирования.

Для регионов, использующих водные ресурсы рек Волги и Кубани, при обосновании комплекса водохозяйственных мероприятий для обеспечения устойчивого функционирования ВХС и рационального использования воды сформированы сценарии регионального развития как относительно самостоятельных подсистем (в соответствующих работах принимали участие Институт водных проблем РАН, СевкавНИИВХ, Гидропроект, Севкавгипроводхоз, МИРЭА, ГХИ Росгидромета, Кубаньгипроводхоз, ВодНИИИнформпроект, ГНУ ВНИИГиМ). Сценарии гене-

---

рируются на основе социально-экономического анализа сложившейся территориальной структуры производства, намечаемой динамики роста, предлагаемой Минэкономразвития России, и воздействия территориальных факторов.

Так, перспективы развития водоемких отраслей в бассейне р. Кубани учитывают благоприятные природно-климатические условия для аграрно-промышленного и курортно-рекреационного комплексов, выгодное географическое положение для транспортной связи с другими государствами, имеющий значительный индустриальный потенциал. При этом каждый из регионов, расположенных в бассейне, имеет специфические особенности развития. В Республике Адыгея наиболее перспективным является освоение ресурсов минеральных вод и повышение уровня использования рекреационного потенциала. В Карачаево-Черкесской Республике приоритетом является развитие аграрно-промышленного комплекса. Для Краснодарского края первоочередное значение имеет развитие морских портов и рекреационной зоны Большого Сочи, а также производство высококачественных товаров и услуг для населения и туристов. Для Ставропольского края актуально наращивание производства сельскохозяйственной продукции и структурная перестройка промышленности для сокращения доли энергоемких отраслей. Для каждого региона выделяются три сценария: пессимистический, базовый и оптимистический.

Основные проблемы социально-экономического развития Волжско-Каспийского региона, включающие полностью или частично Центральный, Северо-Западный, Южный, Северо-Кавказский, Приволжский и Уральский федеральные округа, следующие:

- . освоение ресурсов углеводородного сырья и развитие топливно-энергетического комплекса субъектов Российской Федерации, расположенных на территории бассейна;
- . сокращение различий в уровнях социально-экономического развития регионов бассейна;
- обустройство Волги как одной из главных воднотранспортных артерий страны; решение принципиальных проблем по оздоровлению вод в бассейне. В Центральном округе наибольшие темпы роста предполагаются в машиностроении, пищевой, легкой промышленности, а также промышленности строительных материалов. Практически неизменны доли химической и нефтехимической промышленности, а также отраслей лесного комплекса. Уменьшается доля электроэнергетики, черной и цветной металлургии. Ускоренное развитие промышленности планируется в г. Москве, Московской, Владимирской, Калужской и Ярославской областях.

В Северо-Западном округе опережающее развитие получают машиностроение и отрасли лесной, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности. Существенно уменьшается доля металлургии и электроэнергетики.

В Северо-Кавказском и Южном округах наиболее высокие темпы роста намечаются в машиностроении, химической, пищевой, легкой промышленности, а также в промышленности строительных материалов при существенно более низ-

ком росте остальных отраслей, что обусловлено изменениями в отраслевой структуре регионов.

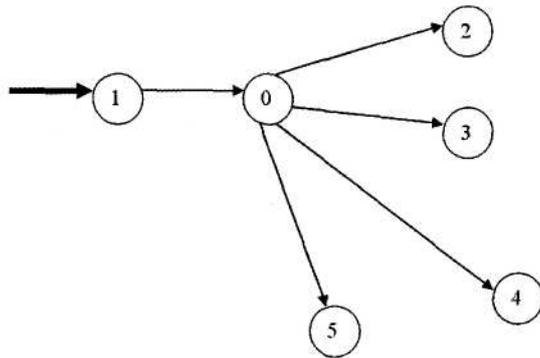
Рост промышленного производства Приволжского округа превысит аналогичные показатели России. Наибольшее ускорение, превышающее рост промышленности в целом по России, прогнозируется в развитии всех обрабатывающих отраслей: машиностроения, химической, нефтехимической, лесной, пищевой, легкой промышленности и промышленности строительных материалов. Рост электроэнергетики и топливной промышленности округа находится на уровне среднего по России. В территориальной структуре производства усиливается роль Республик Татарстан и Мордовия, Нижегородской, Пермской, Самарской и Ульяновской областей.

Рост промышленности Уральского округа характеризуется самым низким показателем среди федеральных округов; он обусловлен невысокими темпами роста сырьевых отраслей, в первую очередь топливной. Её доля в промышленности даже к концу прогнозируемого периода, на протяжении которого происходит существенное снижение роли ТЭК, будет превышать 44 %, а с электроэнергетикой - 50 %. Из всех отраслей промышленности только три - электроэнергетика, черная и цветная металлургия - имеют ускорение в развитии, превышающее среднее по России. Рост топливной промышленности отстает, хотя и незначительно, от среднего по стране. Темпы роста остальных отраслей не достигают темпов роста одноименных отраслей на федеральном уровне, но существенно превышают рост всей промышленности округа.

На базе сценариев развития регионов формируются варианты долгосрочного спроса на водные ресурсы. На неопределённость реализаций прогнозируемых вариантов спроса на водные ресурсы налагается стохастический характер их поступления. В результате образуется множество включаемых в модель стохастических условий  $Q$ .

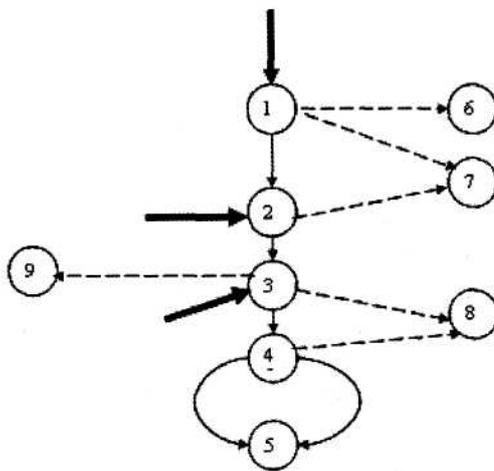
### **4.3. Структуризация водохозяйственных систем**

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, как показано на рис. 4.1, где приведена веерная структура ВХС бассейна р. Кубани, водопользователями которой выступают Республика Адыгея, Карачаево-Черкесская Республика, Красноярский и Ставропольский края. Веерная структура ВХС бассейна Волги отличается от приведенной на рис. 4.1 только значительно большим числом (тридцать девять) регионов, претендующих на волжскую воду. В сетевой структуризации бассейн реки изображается сетью, потоки которой моделируют потоки воды. Водопользователи изображаются вершинами, в которые поступают водные ресурсы. Сетевая структуризация бассейна Кубани представлена на рис. 4.2, бассейна реки Волги, выполненная А.В. Готовцевым [Готовцев, 2001], - на рис. 4.3 и 4.4. Регионы могут пользоваться водными ресур-



**Рис. 4.1. Веерная структуризация водопользования в бассейне р. Кубань.**

1 - р. Кубань водоисточник; 2-5 - водопользователи: 2 - Краснодарский край, 3 - Ставропольский край, 4 - Республика Адыгея, 5 - Республика Карачаево-Черкесская



**Рис. 4.2. Сетевая структуризация водопользования в бассейне р. Кубань.**

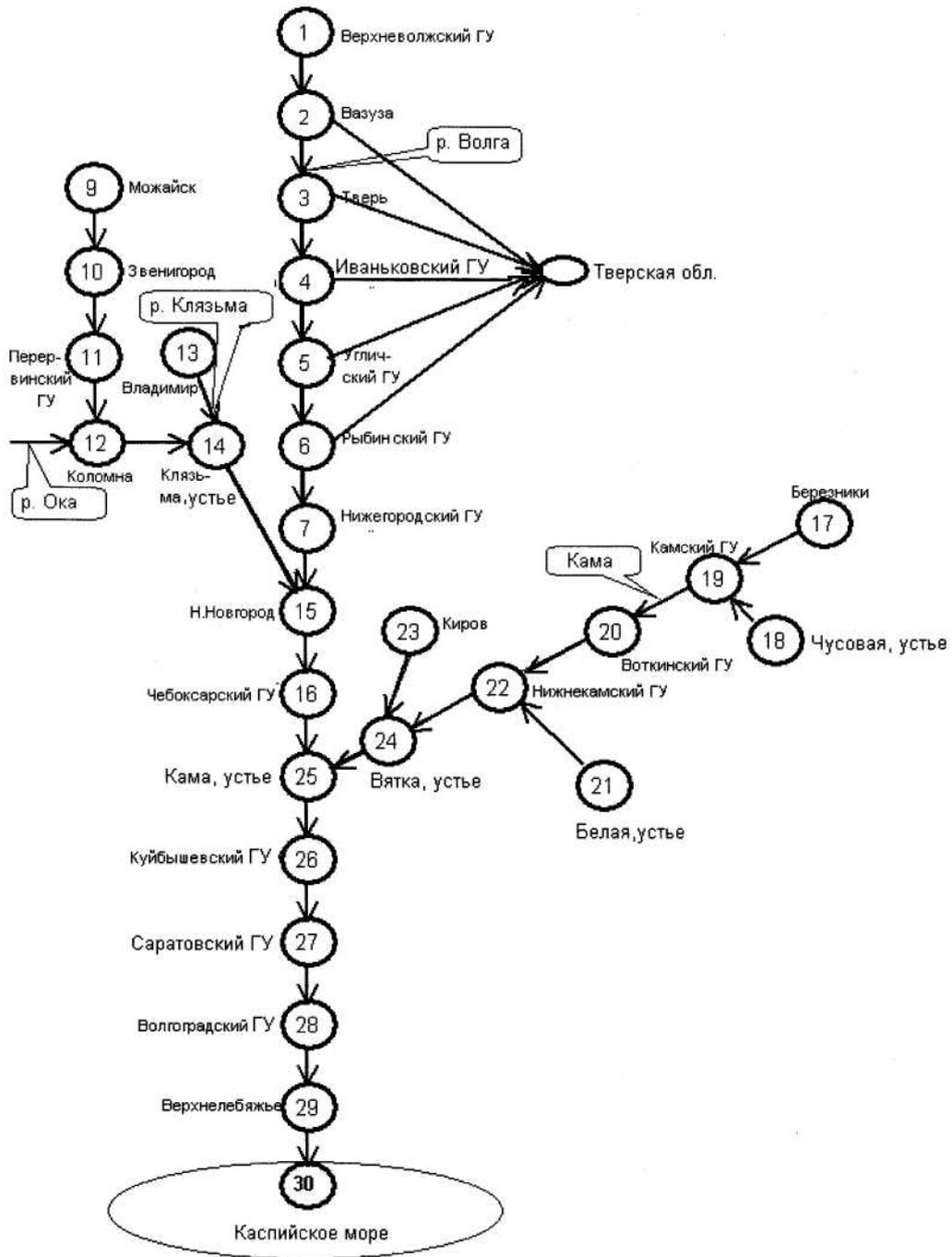
Вершины: 1 - Усть-Джегута, 2 - Невинномысск, 3 - Краснодар, 4 - Тиховский гидроузел (строящийся для регулирования потоков воды в створе разделения русла Кубани на Протоку и собственно Кубань), 5 - Азовское море, 6 - Карачаево-Черкесская республика, 7 - Ставропольский край, 8 - Краснодарский край, 9 - Адыгейская республика. Дуги: 1: 1-2 Усть-Джегута-Невинномысск (русло), 2: 1-6 Усть-Джегута-Карачаево-Черкессия, 3: Усть-Джегута-Ставропольский край (ЕСК), 4: 2-3 Невинномысск-Краснодарское водохранилище (русло), 5: 2-7 Невинномысск-Ставропольский край (Невинномысской канал), 6: 3-4 Краснодарское водохранилище-Тиховский гидроузел (русло), 7: 3-8 Краснодарское водохранилище - Краснодарский край, 8: 3-9 Краснодарское водохранилище - Адыгейская республика, 9: 4-8 Водообеспечение Краснодарского края из р Кубань, 10: 4-5 (а) Тиховский гидроузел - Азовское море (русло Протоки), 11: 4-5 (б) Тиховский гидроузел - Азовское море (русло Кубани)

сами, условно сосредоточенными в различных речных створах, изображаемыми вершинами сети, как показано на рис. 4.2 для Кубани и на рис. 4.3 для Волги. Из одного створа водные ресурсы могут поступать в несколько регионов (см. рис. 4.4).

#### 4.4. Последовательное уточнение стратегий водопользования

Вначале, на первом этапе, рассматриваемая ВХС структурируется в виде веерной схемы, аналогичной представленной на рис. 4.1, после чего формируется

Рис. 4.3. Сетевая структуризация водопользования в Волжском бассейне (на примере Тверской области) 105



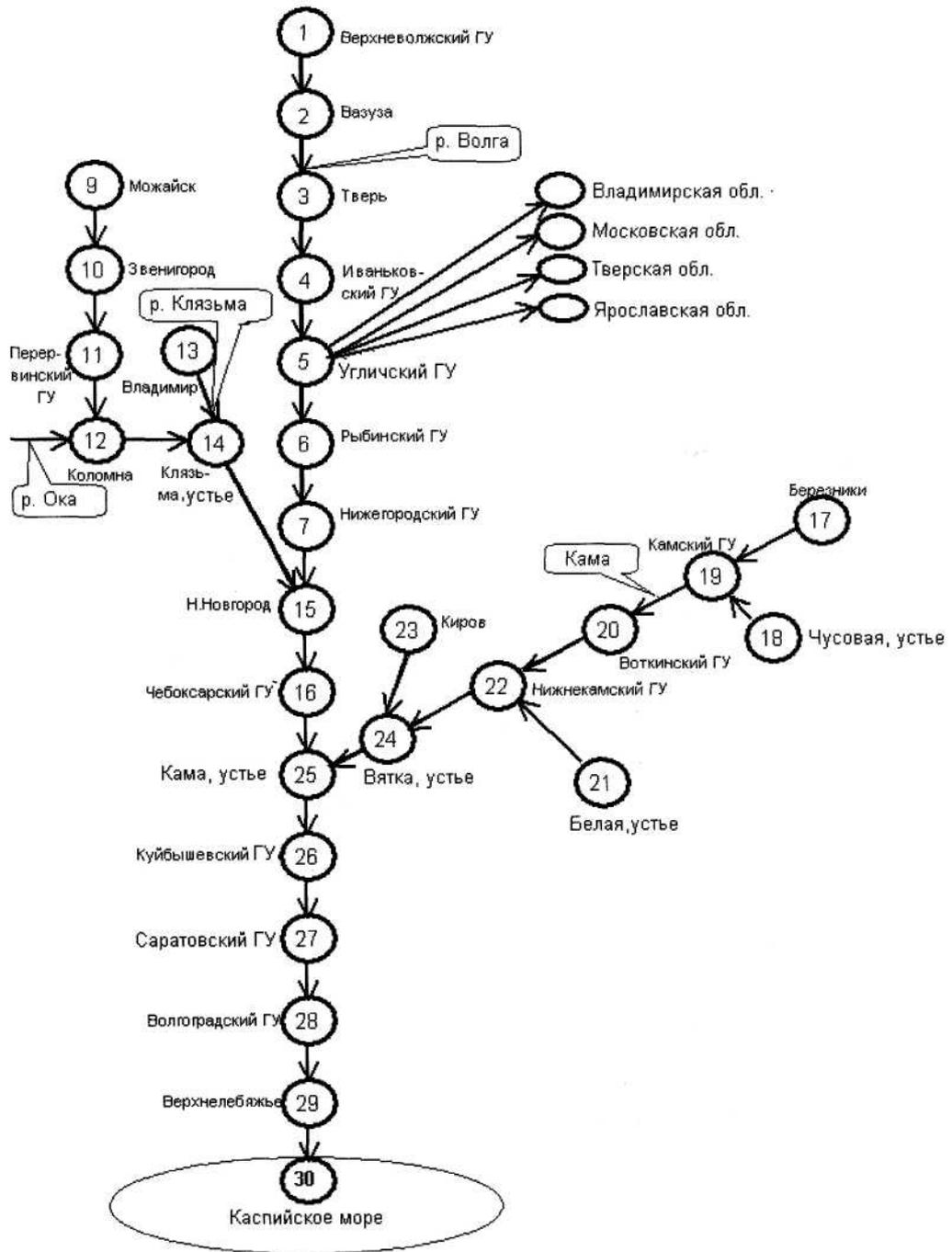


Рис. 4.4. Сетевая структуризация поставок водных ресурсов в регионы Волжского бассейна (на примере Углического гидроузла)

статическая модель распределения водных ресурсов. Все располагаемые водные ресурсы объединяются в совокупный водный ресурс бассейна за весь расчётный период и помещаются в вершину, изображающую источник (вершина 1 на

рис. 4.1), мощность которого  $B^\omega$ .

соответствует совокупному ресурсу при реализации со стохастических условий. При использовании воды этого источника в нём

необходимо оставлять не менее  $B_{\min}^\omega$  водных ресурсов для удовлетворения экологических, экономических и социальных (естественно, включая санитарно-гигиенические) требований. В каждом  $s$ -м регионе из множества регионов  $S$  формируется совокупный спрос на водные ресурсы  $x_s^\omega$  и их гарантированные

значения  $X_s$  при реализации стохастических условий со и  $x_s^\omega$  и  $X_s$  определяются их ниж-

ние границы. Характеристики спроса на водные ресурсы следуют из сценариев развития регионов. Они предъявляются ЛПР (лицами, принимающими решения) от имени регионов; ЛПР, в частности, оценивают эффективность использования водных ресурсов. Например, производственные функции регионов могут формироваться в виде взвешенной суммы эффективностей отраслей

$f_s^\omega(X_s, x_s^\omega) = \sum_{l \in L_s} \alpha_{sl} f_{sl}^\omega(X_s, x_{sl}^\omega)$ , где  $\alpha_{sl}$  - неотрицательный коэффициент значимости  $l$ -й отрасли в регионе с учётом взаимосвязей водопользователей регионов. ( $\alpha_{sl} \leq 1$ ),

Модель описывается задачей определения векторов  $x^0 = \{x_s^{\omega 0}, |s \in S, \omega \in \Omega\}$  и  $X^0 = \{X_s^0, |s \in S\}$ , максимизирующую математическое ожидание эффективности использования водных ресурсов бассейна

$$f(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} f_s^\omega(X_s, x_s^\omega) \quad (4.1)$$

на множестве, выделяемом ограничениями на объёмы используемой воды,

$$\sum_{s \in S} x_s^\omega \leq b^\omega = B^\omega - B_{\min}^\omega \quad (4.2)$$

и требованиями регионов к минимальным значениям, поставляемых им водных ресурсов

$$x_s^\omega \geq \underline{x}_s^\omega, \quad X_s \geq \underline{X}_s.$$

Решение этой двухэтапной задачи стохастического программирования не вызывает затруднений. В частности, бисепарабельность целевой функции (4.1) и отделимость ограничений (4.2) и (4.3), формирующих допустимое множество, делают возможным применить метод динамического программирования [Беллман, 1960]. Для решения задачи (4.1)—(4.3) и всех рассматриваемых ниже задач естественно применить метод групповой координатной оптимизации, в котором последовательно отыскивается оптимум по группам переменных  $X$  и  $x$  [D'Esopo, 1959; Райков, 1966]. Этот процесс на каждом шаге соответствует определению оптимальных объёмов водных ресурсов, выделяемых регионам, в различных сто-

хаотических условиях при фиксированных их гарантированных значениях. Полученные величины объемов водных ресурсов используются для уточнения их гарантированных значений. Решение начинается с задания произвольного, допус-

$X^1$ , представляющего гарантированное водопользование регионов, например, все  $X_s^1$  полагаются равными  $\underline{X}_s$ . При фик-

сированном

$$f^\omega(X^1, x^\omega) = \sum_{s \in S} f_s^\omega(X^1, x_s^\omega) \rightarrow \max, \\ \sum_{s \in S} x_s^\omega \leq b^\omega = B^\omega - B_{\min}^\omega, \\ x_s^\omega \geq \underline{x}_s^\omega.$$

тимого для ограничений (4.2) вектора

задача (4.1)—(4.3) распадается на независимые сепарабельные задачи, каждая из которых соответствует реализации стохастических условий со:

(4.4)

Нахождение оптимальных векторов

$x^1 = \{x_s^{\omega^1} | s \in S, \omega \in \Omega\}$ . исходной задачи (4.1)-(4.3). На втором шаге фиксируется найденный на первом шаге вектор  $x^1$ . Задача (4.1)-(4.3) распадается на столько независимых задач

$$f_s(X_s, x_s^1) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f_s^\omega(X_s, x_s^{\omega^1}) \rightarrow \max, \\ X_s \geq \underline{X}_s,$$

сколько координат имеется в векторе  $X$ , то есть, сколько регионов охватывает ВХС бассейна (для Волги - 39, для Кубани - 4). Решение этих простейших задач поиска экстремума функции одного переменного на полуинтервале затруднений не вызывает. Найденный на втором шаге вектор  $X^2$  используется как следующее приближение для нахождения  $x^2$ , а  $x^2$  - для получения следующего приближения  $X^3$  и т.д. Метод групповой координатной оптимизации привлекателен тем, что дает возможность наблюдать и оценивать последовательные приближения к оптимальному решению.

В задаче (4.1)—(4.3) и всех ниже рассматриваемых задачах по составлению долгосрочных стратегий развития ВХС, отыскивается максимум вогнутых функций на выпуклых множествах, выделяемых линейными ограничениями. Для сходимости описанного итерационного процесса определения максимума  $f(X, x)$  по группам координат  $X$  и  $x$  достаточно, чтобы задача (4.1)-(4.3) обладала свойством одноэкстремальности подзадач (4.4) или монотонности целевых функций в задачах (4.5) [Райков, 1966]. Такими свойствами обладают все задачи, рассматриваемые в данной работе. Это следует из свойств рассмотренных в главе 3 производственных функций, описывающих использование водных ресурсов.

Решая задачу (4.1)-(4.3), можно установить, существует ли хотя бы гипотетическая возможность удовлетворить запросы пользователей. Если при решении этой задачи обнаруживается отсутствие допустимого вектора, то необходимо пересмотреть экзогенные параметры модели, в частности, требования регионов

(4.3). Если допустимые векторы задачи (4.1)-(4.3) существуют, то с участием ЛПР проводится анализ полученного решения, в котором наряду с оптимальными величинами водопользования  $x_s^{\omega 0}$  и их гарантированными значениями  $X^{\circ}$  участвуют надёжность гарантированного водопользования  $P(X^{\circ})$ , стоимостные оценки водных ресурсов  $C_x^{\omega 0}$  и  $C_X^0$ , величины рисков  $R(X^{\circ}, x^{\circ})$  и шансов  $D(X^{\circ}, x^{\circ})$ . При положительной оценке достигнутого результата осуществляется переход ко второму этапу, на котором рассматриваются динамическая веерная и статическая сетевая модели. В противном случае модель первого этапа пересматривается.

На втором этапе уточняются решения, полученные на первом этапе. В модели, основанной на веерной структуризации, расчётный период  $T$  разбивается на дискретные интервалы  $t \in T$ . Длительность интервалов, на которые период разбит, учитывая доступную информацию, принимается кратной годам. В начале расчётного периода используются годовые интервалы, далее - трех-, пяти- и даже десятилетки, в соответствии с временным разбиением расчётного периода уточняются сценарии развития регионов и характеристики располагаемых водных ресурсов. Для ВХС бассейнов Волги и Кубани, регулирование стока которых носит, в основном, сезонный характер, веерная модель описывается задачей, отличающейся от задачи (4.1)–(4.3) только размерностью, которая увеличивается из-за учёта водопользования внутри расчётного периода.

В ней требуется определить вектор  $X^{\circ}, x^{\circ}$  с составляющими максимизирующий эффективность использования водных ресурсов в течение расчётного периода, вообще говоря, отличающуюся в различных временных интервалах

$$f(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} f_{st}^{\omega}(X_{st}, x_{st}^{\omega}). \quad (4.6)$$

Вектор  $X^{\circ}, x^{\circ}$  выбирается из допустимого множества, выделяемого условиями возможного использования водных ресурсов

$$\sum_{s \in S} x_{st}^{\omega} \leq b_t^{\omega} = B_t^{\omega} - B_{t, \min}^{\omega}, \quad t \in T, \quad (4.7)$$

и требованиями регионов к объёмам поставляемых им водных ресурсов

$$x_{st}^{\omega} \geq \underline{x}_{st}^{\omega}, \quad X_{st} \geq \underline{X}_{st}, \quad t \in T. \quad (4.8)$$

Решая задачу (4.6)-(4.8), так же, как и задачу (4.1)–(4.3), можно получить ответ на вопрос, возможно ли удовлетворить запросы пользователей. В задаче (4.6)-(4.8) указанные запросы и возможности их удовлетворения представлены более подробно, чем в задаче (4.1)-(4.3). Если при анализе решения задачи (4.6)-(4.8) обнаруживается отсутствие допустимого решения либо полученный вектор, соответствующий оптимальному водопользованию, оценивается недостаточно хорошо  $R_{st}(X_{st}^{\circ}, x_{st}^{\circ})$  (например, получаются слишком большие риски то необходимо

пересмотреть экзогенные параметры задачи (4.6)-(4.8). Эта процедура, вообще говоря, неформализуемая, осуществляется, в основном, ЛПР регионов. Если такая корректировка задачи (4.6)-(4.8) не дает результата, то происходит возврат к статической региональной модели первого этапа и корректируется задача (4.1)-(4.3). При положительной оценке результата формируется модель, основанная на сетевой структуризации ВХС, и решается описывающая её задача, которая на этом (втором) этапе является статической.

Статическая сетевая модель  $X_s^0$  и  $x_s^{\omega 0}$  представлена в главе 3.  
 Приведём её для полноты сети  $\Gamma(Y, S)$ , которые удовле-

картины. В ней определяются потоки  
 творяют уравнениям баланса масс в вершинах сети

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega x_s^\omega - \sum_{s \in S_i^-} x_s^\omega + b_i^\omega = 0, \quad i \in J. \quad (4.9)$$

Ограничения на величины потоков и их гарантированные значения имеют вид

$$\overline{x_s^\omega} \geq x_s^\omega \geq \underline{x_s^\omega}, \quad X_s \geq \underline{X_s}, \quad s \in S. \quad (4.10)$$

Потоки  $X_s$ , имитирующие гарантированные объёмы водных ресурсов, относятся

$$f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$$

только к своим дугам. Они взаимосвязаны через целевые функции  
 которые в этой задаче описывают не только эффективность использования вод-  
 ных ресурсов регионами, но и эффективность водопользования в русле реки.

В задаче максимизируется эффективность использования всех располагаемых  
 в течение расчётного периода водных ресурсов

$$f(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} f_s^\omega(X_s, x_s^\omega). \quad (4.11)$$

Применение метода групповой  
 координатной оптимизации для определения оптимальных потоков задачи (4.9)—  
 (4.11) отличается от его применения к задаче (4.1)-(4.3) только классом задач,  
 получаемых при фиксированных значениях гарантированного водопользования.  
 Аналогом задач (4.4) в этом случае являются выделяемые из задач (4.9)—(4.11)  
 задачи

$$f^\omega(X^1, x^\omega) = \sum_{s \in S} f_s^\omega(X_s^1, x_s^\omega) \rightarrow \max, \quad (4.12)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega x_s^\omega - \sum_{s \in S_i^-} x_s^\omega + b_i^\omega = 0,$$

$$\overline{x_s^\omega} \geq x_s^\omega \geq \underline{x_s^\omega}.$$

Для нахождения оптимальных  
 векторов этих сетевых распределительных  
 задач разработаны и используются  
 специальные программы, в частности, программа, реализующая весьма  
 эффективный потоковый алгоритм [Лазебник, Миронова, 1983].

Сетевая модель (4.9)—(4.11) так же, как веерные модели (4.1)—(4.3) и (4.6)-  
 (4.8), оценивает возможность удовлетворить запросы регионов. При этом более  
 подробно учитываются возможности поставок водных ресурсов из различных час-  
 тей ВХС. При анализе решений  $X^\omega, x^\omega$ , получаемых в модели (4.9)-(4.11), так же,

как в веерных моделях, участвуют значения надёжности гарантированного водно-  
 нок водных ресурсов  $C_x^{\omega 0}$  и  $C_X^0$ , поставляемых пользователям. К этим показате-  
 пользования  $P(X)$ , рисков  $R(X^\circ, x^\circ)$ , шансов  $D(X^\circ, x^\circ)$  и  
 стоимостных оце-  
 лям в модели (4.9)—(4.11) добавляются оптимальные  
 экономические оценки до-  
 полнительных единиц водных ресурсов  $C_i^{\omega 0}(X^0, x^0)$

в выделенных створах ВХС.

При отсутствии допустимого вектора задачи (4.9)—(4.11) или при отрицательной  
 оценке достигнутого результата (например, в некоторых регионах ЛПР не устраи-  
 вают чрезмерно высокие экономические оценки водных ресурсов) задача (4.9)-  
 (4.11) пересматривается. Если при корректировке задачи не удастся достичь по-  
 ложительного результата, то осуществляется возврат на первый этап и корректи-  
 руется задача (4.1)-(4.3). При положительной оценке результата в обеих моделях  
 второго этапа следует переход к третьему этапу, представленному сетевой дина-  
 мической задачей.

Модели, рассматриваемые на втором этапе, уточняют возможности удовле-  
 творения потребностей регионов в водных ресурсах и показатели эффективности  
 их использования, полученные на первом этапе. Модель (4.6)-(4.8) уточняет ре-  
 шения задачи (4.1)-(4.3) во времени, а модель (4.9)—(4.11) - в пространстве. На  
 третьем этапе в динамической сетевой модели осуществляется еще более полная  
 оценка рационального использования водных ресурсов во времени и в простран-  
 стве совместно.

Модель выработки стратегий управления на третьем этапе представлена зада-  
 чей

$$x^0 = \{x_{st}^{\omega 0} | s \in S, \omega \in \Omega, t \in T\} \text{ и } X^0 = \{X_{st} | s \in S, t \in T\}$$

определения  
вектора потоков  
 $X^\circ, x^\circ$ . Составляющие

его потоки

соответствуют объёмам  
 воды и их гарантированным значениям в элементах ВХС. Сеть  $T(J, S)$  - та же,  
 что и на втором этапе. Вектор  $X, x$  максимизирует эффективность использова-  
 ния водных ресурсов ВХС в течение

$$f(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} f_{st}^\omega(X_{st}, x_{st}^\omega) \text{ расчётного периода} \quad (4.13)$$

на множестве, выделяемом уравнениями, описывающими баланс масс воды в  
 створах ВХС,

$$\sum_{s \in S_i^+} k_{st}^\omega x_{st}^\omega - \sum_{s \in S_i^-} x_{st}^\omega + b_{it}^\omega = 0, \quad i \in J, \quad t \in T, \quad \omega \in \Omega, \quad (4.14)$$

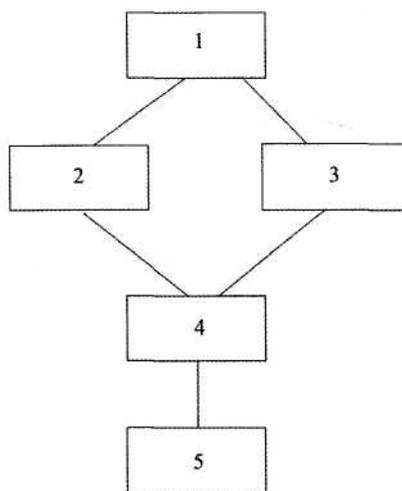
и ограничениями на величины  
 потоков в дугах,  
 соответствующих объёмам  
 воды в элементах ВХС,

$$\overline{x_{st}^\omega} \geq x_{st}^\omega \geq \underline{x_{st}^\omega}, \quad X_{st} \geq \underline{X_{st}}, \quad s \in S, \quad t \in T, \quad \omega \in \Omega. \quad (4.15)$$

Задача (4.13)—(4.15) относится к классу двухэтапных стохастических сетевых  
 распределенных задач, что эквивалентно задаче (4.9)—(4.11) на расширенной сети  
 $\Gamma(J, S)$ . Сеть  $\Gamma(Y, S)$  формируется на базе исходной сети  $T(J, S)$  дублированием  
 её столько раз, на сколько интервалов времени разбит весь расчётный период

Т. Решение этой задачи, отличающейся от задачи (4.9)—(4.11) только большей размерностью, вновь осуществляется применением метода групповой координатной оптимизации. При получении в этой задаче приемлемого результата осуществляется переход к еще более детальной имитационной модели четвертого этапа, в противном случае - возврат на второй этап в сетевую модель (4.9)—(4.11) с коррекцией её экзогенных параметров.

Необходимость учёта особенностей водопользования, отсутствующих в оптимизационных моделях, предполагается отразить в моделях имитационного типа на четвертом этапе. В них со значительно большей подробностью представлены параметры, не учтенные в моделях оптимизации по экономическим, информационным, вычислительным, технологическим, техническим и иным соображениям. Эти модели, как правило, ориентированы на условия функционирования ВХС [Ярошевский, 1986]. В такой модели, как и в иных моделях имитационного типа, целевая функция в явном виде отсутствует [Нейлор, 1975; Системный подход..., 1985], но удается более подробно описать условия функционирования ВХС, воспроизводящие многие особенности, которые не учитываются в моделях оптимизации. Отсутствие в моделях имитационного типа целевой функции для отыскания допустимого решения 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, в частности, рассмотреть внутригодовую динамику управления водохранилищами сезонного регулирования рек Волги и Кубани.



**Рис. 4.5. Взаимосвязь моделей обобщения развития ВХС.**

Типы моделей: 1 - статистическая всерная; 2 - динамическая всерная; 3 - статистическая сетевая; 4 - динамическая сетевая; 5 - имитационная

Вариантные расчёты с использованием имитационных моделей проводятся индивидуально для каждой реализации стохастических условий при фиксированных значениях гарантированного водопользования, которые можно представить и в более подробной форме. Здесь также напрашивается более детализированная форма экономической информации, которая, однако, не может быть сведена к уровню точности и детальности других данных, особенно на отдаленную перспективу. В результате серии вариантных расчётов ЛПР, руководствуясь, в основном, неформализованными

соображениями о предпочтительных режимах, выбирает рациональный вариант функционирования ВХС.

Если в результате серии имитационных экспериментов удастся найти приемлемое решение, процесс выработки

стратегии рационального управления ВХС можно полагать завершённым. В противном случае осуществляется возврат к модели третьего этапа, которая трансформируется в соответствии с невязками, выявленными на четвертом этапе.

Описанную выше взаимосвязь четырёх этапов применения моделей иллюстрирует рис. 4.5.

#### 4.5. Заключение

Обоснование стратегий долгосрочного развития ВХС для согласования потребностей водопользования с возможностью их удовлетворения сопряжено с выработкой воздействий в условиях неопределённости, которую методологически невозможно устранить. Для преодоления связанных с этим трудностей предлагается подход, основанный на адаптации к изменениям условий, при которых ВХС может оказаться в весьма отдалённом будущем. Основу подобного подхода составляет развитая в теории управления водными ресурсами методология гарантированного водопользования. Этот подход положен в основу четырехэтапного комплекса математических моделей, последовательно уточняющих решения, где стратегии сравниваются, отбраковываются и выбираются рациональные.

Выработка стратегий долгосрочного развития ВХС с использованием предложенного комплекса математических моделей осуществляется при участии в этом процессе ЛПР. ЛПР предлагает сценарии развития регионов и соответствующие им требования к водным ресурсам, анализируют решения, получаемые в моделях, корректируют как сценарии, так и характеристики использования водных ресурсов.

Комплекс моделей, представленных в данной работе, ориентирован на реальную информацию для ВХС бассейнов рек Волги и Кубани. При уточнении информации для указанных ВХС и в процессе выработки долгосрочных стратегий управления иными ВХС состав моделей и их структура могут подвергаться модификации. При этом часть из предложенных моделей может быть исключена из рассмотренной системы, что несколько не изменяет общую идеологию их взаимодействия. Это положение остается справедливым, если комплекс моделей дополняется иными моделями.

Методология изложенного в данной работе подхода к выработке долгосрочных стратегий использования водных ресурсов адаптируется к обоснованию стратегий управления в условиях неопределённости систем, отличающихся от ВХС. В первую очередь, это относится к развитию структуры отраслей народного хозяйства, таким как энергетика, транспорт, нефте- и газоснабжающие системы и другие, структура и степень неопределённости условий функционирования которых, особенно на отдалённую перспективу, аналогична многим показателям ВХС.

## Глава 5

# ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ КАК ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СОГЛАСОВАНИЯ СТРАТЕГИЙ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Выработка стратегий управления ВХС связана с необходимостью учёта активности её элементов - водопользователей, являющихся управляемыми организационными системами, которые обладают собственными интересами и предпочтениями. Элементы могут сознательно искажать информацию о требованиях, предъявляемых к водным ресурсам, и эффективности их использования. Это происходит в действительности. Заявки на воду и показатели эффективности функционирования, сообщаемые пользователями, как правило, оказываются завышенными. Наоборот, получаемые от проектных организаций оценки ресурсов, используемых в строительстве и реконструкции водохозяйственных объектов, как правило, оказываются заниженными.

Решение проблемы распределения водных ресурсов и управления их качеством требует согласования интересов элементов, обладающих свободой выбора своего состояния. Для этого ВХС рассматриваются как активные системы, объектами управления которых являются активные элементы, реализующие собственные предпочтения, целенаправленно манипулируя информацией о своих возможностях, целях и эффективностях. Такой подход представляет собой привнесение в теорию управления водными ресурсами методологии активных систем, развитой в [Бурков, 1977; Бурков, Кондратьев, 1981; Бурков, Лернер, 1971; Бурков, Новиков, 1999; Опойцев, 1977, 5, 7, 8, 17], и теории игр с непротиворечивыми интересами [Ватель, Ерешко, 1973; Гермейер, 1976; Гермейер, Моисеев, 1974; Моисеев, 1975].

Подход к управлению ВХС как активной системой впервые был описан в [Бурков и др., 1980], где рассмотрено распределение водных ресурсов в системе веерного типа - центр распределяет дефицитные водные ресурсы между пользователями, которые непосредственно между собой не связаны. В [Бурков и др., 1990] этот подход распространён на распределение водных ресурсов пользователям, связанных условиями поступления, перемещения и использования воды. ВХС структурирована в виде активной двухуровневой потоковой системы. Управляющий орган ВХС (центр) осуществляет механизм открытого управления (честной игры) и добивается совершенного согласования собственной цели и целей элементов в детерминированных условиях поступления и использования вод-

ных ресурсов. Близкие теоретико-игровые постановки использованы в формировании механизмов компенсации противоречий водопользователей и анализе структур согласования их интересов в [Агасандян и др., 2003].

В данной работе механизм открытого управления распространяется на согласование интересов управляющего органа и элементов ВХС в стохастических условиях. Рассматривается не только использование водных ресурсов, но и управление их качеством. Как и в [Бурков и др., 1990], ВХС представлена активной двухуровневой системой, в которой продукция производится элементами, взаимосвязанными условиями перемещения и использования водных ресурсов. Центр в её работе непосредственно участия не принимает. Он влияет на эффективность функционирования элементов назначением показателей водопользования и водоотведения. Элементы стремятся минимизировать затраты, связанные с их функционированием. Центр стремится минимизировать функцию, которой оценивается функционирование всей ВХС - затраты, складывающиеся из затрат отдельных элементов. Он добивается согласованности, при которой элементы, преследуя собственные цели, реализуют состояния, обеспечивающие достижение целей системы.

Центр - метаигрок с правом первого хода; он управляет ВХС назначением стратегии и тем самым влияет на выбор игроками второго уровня - пользователями - своих состояний. Он проводит встречный способ планирования и реализует механизм открытого управления, предполагающий полную информированность игроков о возможных стратегиях и принципах стимулирования принимаемых решений. Каждый цикл планирования состоит из четырех этапов. На первом этапе элементы сообщают в центр свои функции предпочтения. На втором центр на основании полученных функций предпочтения определяет план системы. На третьем этапе элементы выбирают свои состояния. На четвертом определяются достигнутые значения целевых функций элементов и всей ВХС. Механизм управления в данной работе предполагается постоянным, так как его изменение связано с существенными материальными, временными, трудовыми, психологическими и другими затратами.

Инструментами управления являются объёмы воды, выделяемые пользователям, и массы примесей, отводимых ими в водные объекты, а также цены за эти ресурсы. Величины объёмов воды и масс примесей определяются в результате решения базовой задачи, описывающей функционирование ВХС. Цены формируются переменными двойственной задачи.

### 5.1. Поточковый формализм

Рассматриваемые в данной работе базовые задачи моделируют рациональное использование водных ресурсов и управление их качеством. Так же, как в главах 3 и 4, они основаны на структуризации, в которой ВРС изображаются сетью  $T(J,S)$ . Множество вершин сети  $J$  соответствует местам расположения источников, водохранилищ, соединений рек и каналов, изъятия и возврата воды и т.д. Множество

дуг  $S$  изображает пользователей, участки рек и каналов. Элементы  $T(J,S)$  обладают собственными параметрами и характеристиками, соответствующими параметрам и характеристикам элементов ВХС. Их взаимодействие в моделях описывается как взаимодействие потоков, соответствующих потокам воды и примесей. Оптимальное функционирование ВРС описывается задачами определения оптимальных потоков в  $T(J,S)$ .

Функционирование ВХС описывается двухэтапными задачами стохастического программирования, в которых в качестве переменных величин наряду с потоками, изображающими реальные перемещения воды и примесей, включены потоки, изображающие их гарантированные значения - ориентиры. Экономические результаты использования водных ресурсов зависят как от переменных, изображающих реальные потоки водных ресурсов и примесей, так и от переменных, соответствующих ориентирам. В отличие от реальных потоков, которые удовлетворяют системе уравнений неразрывности в вершинах  $T(J,S)$ , гарантированные потоки принадлежат только своим пользователям. Они соответствуют объемам водных ресурсов и масс примесей, на которые ориентируются пользователи при проведении необходимых подготовительных работ и планировании использования других неводных ресурсов. В базовых задачах они играют роль стратегических переменных (первого этапа), выбираемых при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий. Тактическими переменными (второго этапа), определяемыми при известных реализациях стохастических условий, являются значения потоков, соответствующих объемам водных ресурсов и массам примесей. Множества возможных реализаций стохастических условий  $\Omega$  состоят из конечного числа элементов  $\omega$ .

Поток на входе  $s$ -й дуги  $x_s^{\omega}$ , моделирующей объем воды, поступающей пользователю, на участок реки  $x_s^{k\omega}$  или канала при реализации © стохастических условий,

связан с потоком в ее конце  $x_s^{\omega}$ , изображающим объем возвращаемой в систему воды, равенством

$$x_s^{k\omega} = k_s^{\omega} x_s^{\omega}, \quad s \in S, \omega \in \Omega, \quad (5.1)$$

с неотрицательным коэффициентом усиления  $k_s^{\omega}$ . Его значение соответствует доле возвращаемого объема воды и не превосходит единицы.

Требования пользователей и ограничения на объемы воды на участках рек и каналов выделяют диапазоны возможных значений потоков

$$\underline{x}_s^{\omega} \leq x_s^{\omega} \leq \bar{x}_s^{\omega}, \quad s \in S, \omega \in \Omega. \quad (5.2)$$

Ограничения снизу  $\underline{x}_s^{\omega}$  соответствуют санитарным попускам, требованиям промышленного производства, заданиям по производству сельскохозяйственной продукции, минимальным судоходным и рыбохозяйственным глубинам и т.п. Ограничения сверху  $\bar{x}_s^{\omega}$  соответствуют пропускным способностям и условиям безопасности сооружений, технологическим особенностям использования воды и т.п. Задание ограничений на величины только входных потоков не нарушает общно-

сти заданий условий функционирования элементов ВХС, так как требования к объемам водных ресурсов на любом участке реки, канала или пользователя приводятся к входу, т. е. пересчитываются в значения  $\underline{x}_s^\omega$  и  $\bar{x}_s^\omega$ .

Кроме потоков  $x_s^\omega$ , величины которых при различных исходах стохастических условий ю могут принимать различные значения, на входах дуг рассматриваются потоки  $X$ , принимающие одни и те же значения при  $\omega \in \Omega$ . Они всех

соответствуют гарантированным объемам водных ресурсов. Их величины принадлежат диапазону

$$\underline{X}_s \leq X_s \leq \bar{X}_s, \quad s \in S, \quad (5.3)$$

с ограничениями снизу  $\underline{X}_s$  и сверху  $\bar{X}_s$  обусловленными физическими и технологическими возможностями использования водных ресурсов. Гарантированные потоки на выходах дуг в модели не вводятся, так как они, в отличие от потоков, изображающих реальное перемещение воды,

В модели включаются потоки, имитирующие на входах  $y_{sl}^\omega$  и выходах  $z_{sl}^\omega$  Дуг  $Y_{sl}$  и  $Z_{il}$ , соответствующие принадлежат только моделируемой дуге и из их гарантированным величинам. Переменные  $Y_{sl}$  и  $Z_{il}$  не вытекают. массы примесей. Вместе с ними вводятся переменные

в отличие от

$$y_{sl}^\omega \text{ и } z_{sl}^\omega,$$

которые могут принимать различные значения при различных

Множество  $L$

исходах стохастических

$$\omega \in \Omega$$

условий, принимают одни и те же значения при всех

$$l \in L.$$

видов примесей конечно

Описание сложных процессов переноса и трансформации примесей аппроксимируется системой линейных дифференциальных уравнений [Streeter, Phelps, 1925; Вавилин, Циткин, 1977]. Из решения этой системы получается зависимость между потоками примесей на входах и выходах дуг, образующих множество  $S_j$  и изображающих в модели пользователей без очистных сооружений, участки рек и каналов.

$$h_{sl}^\omega(y_{sl}^\omega, z_{sl}^\omega) = z_{sl}^\omega - \sum A_s^{\gamma l \omega} y_{s\gamma}^\omega = 0, \quad s \in S_1 \subset S, \quad (5.4)$$

где  $A_s^{\gamma l \omega}$  - коэффициенты, характеризующие перенос и преобразование примесей.

Функциональная связь типа (5.4) между потоками примесей

на входах и вы-

ходах дуг, образующих множество  $S_j$  и изображающих пользователей с очистными сооружениями, отсутствует, так как в зависимости от режимов функцио-

$$y_s^\omega = \{y_{sl}^\omega | l \in L\}$$

нирования очистных сооружений при одних и тех же значениях

$$z_s^\omega = \{z_{sl}^\omega | l \in L\}. \text{ Потоки } y_s^\omega \text{ и } z_s^\omega$$

могут быть получены различные значения

Дуг

множества  $S_j$  взаимосвязаны

затратами на очистку воды.

$$Y_s = \{Y_{sl} | l \in L\} \text{ и } Z_s = \{Z_{sl} | l \in L\}$$

модели-

Взаимосвязи между потоками

рующими гарантированные величины масс примесей, поступающих пользовате-

лям без очистных сооружений, на участки рек и каналов и отводимых от них, отсутствуют. Их значения соответствуют не реальным величинам масс примесей, а являются ориентирами, на которые рассчитывают пользователи. Потоки  $Y$  и  $Z$  пользователей с очистными сооружениями взаимосвязаны затратами в процессе очистки воды.

Требования, предъявляемые к качеству водных ресурсов, задаются в виде ограничений на величины масс примесей в водоемах и их гарантированных значений. Множество видов примесей  $L$  делится по лимитирующим подмножества показателям на

$$L_v, \bigcup_v L_v = L. \quad \text{Примеси множеств } L_v, \text{ образуют } v\text{-е дозы загрязне-}$$

ний, величины которых не должны превышать единицы [Указания..., 1971]. В терминах потоков это означает, что на входе  $s$ -й дуги

$$r_{sv}^{\omega}(y_{sv}^{\omega}, x_s^{\omega}) = \sum_{l \in L_v} d_{sl} y_{sl}^{\omega} - x_s^{\omega} \leq 0, \quad s \in S, \quad (5.5)$$

где  $d_{sl}$  — величина, обратная предельно допустимой концентрации  $l$ -й

примеси в

$s$ -м элементе. Требования к качеству воды, возвращаемой в ВХС, задаются такими же условиями

$$r_{sv}^{\omega}(z_{sv}^{\omega}, x_s^{k\omega}) = \sum_l d_{sl}^k z_{sl}^{\omega} - x_s^{k\omega} \leq 0, \quad s \in S. \quad (5.6)$$

Условия (5.5) и (5.6) предъявляют более жесткие требования к качеству водных ресурсов, чем не превышение значениями концентраций примесей

$$n_{sl}^{\omega} = y_{sl}^{\omega} / x_s^{\omega} \quad \text{и} \quad n_{sl}^{k\omega} = z_{sl}^{\omega} / x_s^{k\omega} \quad \text{величин предельно} \quad \bar{n}_{sl}^{\omega} \quad \text{и} \quad \bar{n}_{sl}^{k\omega}$$

всех примесей порознь. Из этих условий в силу неотрицательности  $n_{sl}^{\omega}$  и  $n_{sl}^{k\omega}$  сле-

дует, что концентрации  $n_{sl}^{\omega}$  и  $n_{sl}^{k\omega}$  удовлетворяющие условиям (5.5) и (5.6), удов-

$$\text{летворяют} \quad n_{sl}^{\omega} \leq \bar{n}_{sl}^{\omega} \quad \text{и} \quad n_{sl}^{k\omega} \leq \bar{n}_{sl}^{k\omega}.$$

На величины потоков

$$y_{sl}^{\omega} \quad \text{и} \quad z_{sl}^{\omega} \quad \text{накладываются}$$

$$y_{sl}^{\omega} \geq \underline{y}_{sl}^{\omega}, \quad z_{sl}^{\omega} \geq \underline{z}_{sl}^{\omega}, \quad s \in S, \quad l \in L, \quad \text{Обратное, вообще говоря, неверно.}$$

которые отражают технологические особенности функционирования элементов ВРС, в частности, максимально возможные степени очистки сточных вод.

Диапазоны возможных значений показателей гарантированного качества водных ресурсов задаются в виде ограничений, аналогичных (5.5)-(5.7), на потоки, соответствующие гарантированным значениям масс примесей в водоемах

$$\underline{R}_{sv}(Y_{sv}) = \underline{X}_s - \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl} Y_{sl} \leq 0, \quad \bar{R}_{sv}(Y_{sv}) = \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl} Y_{sl} - \bar{X}_s \leq 0,$$

$$\underline{R}_{sv}^k(Z_{sv}) = \underline{X}_s^k - \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl}^k Z_{sl} \leq 0, \quad \bar{R}_{sv}^k(Z_{sv}) = \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl}^k Z_{sl} - \bar{X}_s^k \leq 0, \quad s \in S, \quad (5.8)$$

неравенствам

$$(5.7)$$

где  $\tilde{d}_{sl}$  и  $\tilde{d}_{sl}^k$  неотрицательные коэффициенты, отражающие взаимосвязи технологий использования воды с гарантированными величинами масс содержащихся примесей.

Законы сохранения масс водных ресурсов и содержащихся в них примесей в моделях представлены в виде систем уравнений неразрывности потоков в вершинах сети

$$g_i^\omega(x^\omega) = \sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega x_s^\omega - \sum_{s \in S_i^-} x_s^\omega + b_{i0}^\omega = 0, \quad (5.9)$$

$$H_{il}^\omega(v_i^\omega, z_i^\omega) = \sum_{s \in S_i^+} y_{sl}^\omega - \sum_{s \in S_i^-} z_{sl}^\omega + b_{il}^\omega = 0, \quad \forall i \in J, \omega \in \Omega, l \in L, \quad (5.10)$$

где  $S_i^+$  - множество дуг, исходящих из нее;  $S_i^-$  - множество дуг, заходящих в  $i$ -ю вершину,

$b_{i0}^\omega$  - поток  $i$ -й вершины,  $b_{i0}^\omega \geq 0$  - поступающих в  $i$ -ю вершину, при  $b_{i0}^\omega \leq 0$  - исходящих из нее;

$b_{il}^\omega$  - поток  $l$ -й примеси, поступающей в  $i$ -ю вершину, при  $b_{il}^\omega \geq 0$  - поступающих в  $i$ -ю вершину, при  $b_{il}^\omega \leq 0$  - исходящих из нее;

моделирующий фиксированный объем водных ресурсов, при

моделирующий фиксированный объем водных ресурсов, при  $b_{il}^\omega$  - поток  $l$ -й примеси, поступающей в  $i$ -ю вершину. В системе уравнений (5.9) учтены условия (5.1).

Так как пользователям вместе с водой, на участки рек и каналов поступают также примеси, причем их концентрации совпадают с концентрациями примесей в

$$B_{il}^\omega = y_{sl}^\omega x_s^\omega - z_{sl}^\omega x_s^\omega = y_{sl}^\omega / x_s^\omega - z_{sl}^\omega / x_s^\omega = 0, \quad s, \hat{s} \in S_i^-, i \in J, \omega \in \Omega, l \in L, \quad (5.11)$$

створах ВХС, в вершинах сети  $T(J, S)$  должны быть выполнены условия означающие требование совпадения соотношении между концентрациями разнородных потоков на входах дуг, исходящих из одной вершины.

## 5.2. Целевые функции

моделях изображаются дугами, характеризуется функциями затрат  $f_s(W_s) = x^0$ .

Экономические результаты функционирования  $W_s = X_s, Y_s, Z_s, x_s, y_s, z_s$ , элементов ВХС, которые в

Аргументами этих функций являются векторы

$$x_s = \{x_s^\omega | \omega \in \Omega\}, \quad y_s = \{y_s^\omega | \omega \in \Omega\} \quad \text{и} \quad z_s = \{z_s^\omega | \omega \in \Omega\}. \quad \text{Функции } f_s(W_s)$$

включают

издержки на получение, доставку и очистку воды, а также затраты, обусловленные отклонением количества и качества предоставляемых элементов водных ресурсов от наиболее выгодных значений, а также вызванные снижением выработки продукции, объема перевозок, эффекта от предотвращения вредного воздействия вод и т.п. В функциях  $f_s(W_s)$  учитывается также эффект от использования водных ресурсов, который входит в них в виде слагаемых с отрицательным знаком. Они образуют функцию, характеризующую экономические результаты всей системы

Функции затрат элементов оценивают математическое ожидание затрат

$$f(W) = \sum f_s(W_s) \quad (5.12)$$

где  $p^\omega$  - вероятность реализации стохастических условий  $\omega$ .

$$f_s(W) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f_s^\omega(W_s), \quad (5.13)$$

Свойства функций  $f_s^\omega(W_s^\omega)$  - вероятности реализации стохастических условий  $\omega$ .

рассмотрены в [Данилов-Данильян, Хранович,  $X_s, Y_{sl}, Z_{sl}, x_s^\omega, y_{sl}^\omega, z_{sl}^\omega$  в силу закона об убывающей эффективности [Самуэльсон, 1964], в соответствии с которым с увеличением количества водных ресурсов у пользователя падает эффективность использования единицы их объема и с ростом

удельные затраты на доочистку. Это не означает выпуклость  $f_s^\omega(W_s^\omega)$  степени их очистки растут

вокупности. Тем не менее, все известные функции  $f_s^\omega(w_s^\omega) = f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$  - част-

ные случаи функций  $f_s^\omega(W_s^\omega)$ .

по их совокупности которыми оценивается эффективность использования водных ресурсов без учета их качества, выпуклы по совокупности переменных образующих вектор  $w^a$  (например, описанные в [Богачева и др.,

$X_s, x_s^\omega$ ;

2000] и [Елаховский, 1979]).

Эффективность использования водных ресурсов с учетом их качества зависит от соотношений между различными примесями, содержащимися в воде. Также функционально взаимосвязаны степени очистки различных сооружений. Вводятся комплексы примесей  $\bar{Y}_s, \bar{Z}_s, \bar{y}_s^\omega$  и  $\bar{z}_s^\omega$  примесей в

очистных

$$\bar{Y}_s = \sum_{l \in L} \bar{\sigma}_{sl} Y_{sl}, \quad \bar{Z}_s = \sum_{l \in L} \bar{\delta}_{sl} Z_{sl}, \quad \bar{y}_s^\omega = \sum_{l \in L} \sigma_{sl} y_{sl}^\omega, \quad \bar{z}_s^\omega = \sum_{l \in L} \delta_{sl} z_{sl}^\omega, \quad (5.14)$$

где  $\bar{\sigma}_{sl}, \sigma_{sl}, \bar{\delta}_{sl}$  и  $\delta_{sl}$  - коэффициенты, показывающие значимость  $l$ -й примеси в симостях.  $f_s^\omega(w_s^\omega)$  эние сокращает число аргументов функций затрат элементов  $f_s^\omega(W_s^\omega) = f_s^\omega(\bar{W}_s, \bar{Y}_s, \bar{Z}_s, \bar{y}_s^\omega, \bar{z}_s^\omega, x_s^\omega, y_s^\omega, z_s^\omega)$ . Характер зависимостей  $f_s^\omega(\bar{W}_s^\omega)$  от  $\bar{Y}_s, \bar{Z}_s, \bar{y}_s^\omega, \bar{z}_s^\omega$ , описывающих содержание масс примесей в водных ресурсах, при

$w_s^\omega = X_s, x_s^\omega$ , пока не установлен. П  $\bar{W}_s^\omega$  алогии с зави-

можно полагать функции  $f_s^\omega(\bar{W}_s^\omega)$  выпуклыми по совокупности при фиксированных величинах  $\bar{Y}_s, \bar{y}_s^\omega$  и  $\bar{Z}_s, \bar{z}_s^\omega$ . Для дуг мно-

жества  $S_s$ , достаточно выпуклости только по одной из групп переменных  $\bar{Y}_s, \bar{y}_s^\omega$

линейные соотношения (5.4) и (5.14) в этом случае обеспечивают выпуклости фиксированных величинах  $\bar{Y}_s, \bar{Z}_s, \bar{y}_s^\omega, \bar{z}_s^\omega$  Для дуг множества  $S_H$ , доста-

$\bar{Y}_s, \bar{y}_s^\omega$  и  $\bar{Z}_s, \bar{z}_s^\omega$  порознь. Комплексы

$\bar{Y}_s, \bar{y}_s^\omega, \bar{Z}_s, \bar{z}_s^\omega$  исывают массы примесей, поступающих пользователям. С ними связаны

выпуклость  $f_s^\omega(\bar{W}_s^\omega)$  по совокупности

точно выпуклости по группам переменных

затраты на водоподготовку. Комплексы  $\bar{Z}_s, \bar{z}_s^{\omega}$  соответствуют массам примесей после очистки, их значения определяют затраты на нее.

### 5.3. Рациональное использование водных ресурсов

Базовая модель рационального использования водных ресурсов описывается задачей  $D_o$  определения вектора потоков  $w^{\omega} = X^{\omega}, x^{\omega}$ , составляющие которого - вектор гарантированных потоков  $X^{\omega}$ . На векторе  $w^{\omega}$  достигается минимум функции

$$x^{\omega} = \{x_s^{\omega} | s \in S, \omega \in \Omega\}, \quad X^{\omega} = \{X_s^{\omega} | s \in S\} \text{ и вектор реализуемых потоков}$$

$$f(w) = \sum_{s \in S} f_s(w_s) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{s \in S} f_s^{\omega}(w_s^{\omega}), \quad (5.15)$$

оценивающей затраты, связанные с функционированием ВРС без учета качества водных ресурсов. Функция  $f(w)$  - частный случай функции  $f(W)$ , описанной выше (5.12). В ней отсутствуют переменные  $Y, Z, y, z$  «ответственные» за качество водных ресурсов. Вектор  $w^{\omega}$  принадлежит множеству  $G_D$ , выделяемому условиями (5.2), (5.3) и (5.9). Этим вектором описывается оптимальное распределение водных ресурсов в ВХС.

Задача  $D_o$  является задачей центра, которую он должен был бы решать, если

бы ему были известны истинные функции затрат элементов  $f_s^{\omega}(w_s^{\omega})$ . Однако вместо задачи  $D_o$  решается некоторая другая задача  $D$ , отличающаяся от  $D_o$  целевой функцией, которая формируется в виде суммы функций предпочтения  $\varphi_s^{\omega}(w_s^{\omega})$  и  $\psi_s^{\omega}(w_s^{\omega})$ . Функции  $f_s^{\omega}(w_s^{\omega})$  сообщаемых элементами центра. Функции  $\varphi_s^{\omega}(w_s^{\omega})$  и  $\psi_s^{\omega}(w_s^{\omega})$  должны правдоподобно характеризовать эффективность использования водных ресурсов. Их удобно представить в виде

$$\varphi_s^{\omega}(w_s^{\omega}) = f_s^{\omega}(w_s^{\omega}) + \psi_s^{\omega}(w_s^{\omega}). \quad (5.16)$$

Функции  $\psi_s^{\omega}(w_s^{\omega})$  оценивают искажение информации, сообщаемой элементами об эффективности их функционирования. Семейство задач  $\{D\}$  включает также задачу  $D_o$ , в которой  $\psi_s^{\omega}(w_s^{\omega}) \equiv 0$ .

Задачи  $D$  - двухэтапные стохастического программирования. В них стратегическими переменными первого этапа, выбираемыми при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, выступают потоки  $X$ , соответствующие гарантированным значениям объемов водных ресурсов. Тактическими переменными второго этапа, выбираемыми при известных реализациях стохастических условий, являются потоки  $x^{\omega}$ , моделирующие величины реализуемых объемов водных ресурсов. В этих задачах ищется минимум выпуклых функций

$$\varphi(w) = \sum_{\omega \in \Omega} P^\omega \sum_{s \in S} \varphi_s^\omega(w_s^\omega) \tag{5.17}$$

на выпуклом множестве  $G_D$ , выделяемом линейными ограничениями (5.2), (5.3) и (5.9). В них существуют седловые точки функций

$$L_D = \varphi(w) + \Theta_D, \tag{5.18}$$

где

$$\Theta_D = \sum_{\omega \in \Omega} P^\omega \sum_{i \in J} u_i^\omega g_i(x_i) + \sum_{\omega \in \Omega} P^\omega \sum_{s \in S} [\underline{\lambda}_s^\omega [x_s^\omega - x_s^\omega] + \bar{\lambda}_s^\omega [x_s^\omega - \bar{x}_s^\omega]] + \sum_{s \in S} \underline{\Lambda}_s [X_s - X_s] + \bar{\Lambda}_s [X_s - \bar{X}_s].$$

имеют смысл дифференциальных экономических оценок. Они оценивают стоимости

дополнительных единиц воды в соответст-

вующих створах ВХС. Неотрицательные двойственные переменные  $\underline{\lambda}_s^\omega, \bar{\lambda}_s^\omega, \underline{\Lambda}_s, \bar{\Lambda}_s$  характеризуют требования, предъявляемые к объемам водных ресурсов.

Из существования седловой точки функции Лагранжа (5.18) следуют соотношения между оптимальными значениями переменных прямой и двойственной задач [Эрроу и др., 1962]

$$k_s u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} = \frac{\partial \varphi_s^\omega(w_s^{\omega D})}{\partial x_s^\omega} - \underline{\lambda}_s^{\omega D} + \bar{\lambda}_s^{\omega D}, \quad \sum_{\omega \in \Omega} P^\omega \frac{\partial \varphi_s^\omega(w_s^{\omega D})}{\partial X_s} = \underline{\Lambda}_s^D - \bar{\Lambda}_s^D$$

и

$$\underline{\lambda}_s^{\omega D} [x_s^\omega - x_s^{\omega D}] = \bar{\lambda}_s^{\omega D} [x_s^{\omega D} - \bar{x}_s^{\omega D}] = \underline{\Lambda}_s^D [X_s - X_s^D] = \bar{\Lambda}_s^D [X_s^D - \bar{X}_s^D] = 0. \tag{5.19}$$

$$\tag{5.20}$$

Равенства (5.19) являются условиями оптимальности допустимого вектора задачи D, равенства (5.20) - условиями дополняющей нежесткости. При исключении переменных  $\underline{\lambda}_s^{\omega D}, \bar{\lambda}_s^{\omega D}, \underline{\Lambda}_s^D$  и  $\bar{\Lambda}_s^D$  связанных равенствами (5.20), условия (5.19) принимают вид соотношений

$$\frac{\partial \varphi_s^\omega(w_s^{\omega D})}{\partial x_s^\omega} \leq k_s u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} \succ x_s^\omega = x_s^{\omega D}; "=" \succ x_s^\omega < x_s^{\omega D} < \bar{x}_s^{\omega D}; " \geq " \succ x_s^{\omega D} = \bar{x}_s^{\omega D};$$

$$\frac{\partial \varphi(w_s^D)}{\partial X_s} = \sum_{\omega \in \Omega} P^\omega \frac{\partial \varphi_s^\omega(w_s^{\omega D})}{\partial X_s} \leq 0 \succ X_s = X_s^D, = 0 \succ$$

$$\succ X_s < X_s^D < \bar{X}_s, u \geq 0 \succ X_s^D = \bar{X}_s,$$

где  $s$ -я дуга исходит из  $i$ -й вершины и заходит в  $j$ -ю. Соотношения (5.21) представляют собой условия потенциальности оптимальных векторов транспортной задачи на сети с усилением в дугах (первая группа равенств и неравенств), допол-

$\varphi_s^\omega$

по переменным, соответствующим

ненными условиями минимума функций

венств). Символ  $\succ$ , используемый в (5.21) и далее, означает, что предшествующее гарантированным объемам водных ресурсов (вторая группа равенств и нера-

Центр распределяет водные ресурсы в соответствии с решением задачи D. выражение равно, больше или меньше при условии. Например, равенство  $\frac{\partial \varphi'}{\partial x} = ku$  при  $\underline{x} \leq x \leq \bar{x}$  принимает вид « $\Rightarrow$ »  $\succ \underline{x} \leq x \leq \bar{x}$ . Элементы используют выделенные им ресурсы. Оптимальные режимы элементов получаются в результате решения задач наилучшего использования выделенных ресурсов  $w^D$ , в которых минимизируются функции затрат элементов

$$f_s(w) + C_s^D, \quad s \in S. \quad (5.22)$$

$C_s^D$  - цена, по которой вода опускается  $s$ -му элементу.  
Назначением

$$C_s^D$$

цен

$$C_s^D$$

Здесь

центр добивается согласования решений, принимаемых отдельными элементами для достижения целей ВХС - решения исходной задачи  $D_0$ .

Цены определяются с использованием оптимальных значений двойственных переменных задач D, удовлетворяющих условиям оптимальности (5.21), по правилу

$$c_s^{\omega D} = [u_i^{\omega D} - k_s^{\omega} u_j^{\omega D}] x_s^{\omega} + [\bar{\Lambda}_s^D - \underline{\Lambda}_s^D] X_s, \quad C_s^D = \sum_{\omega \in \Omega} P^{\omega} c_s^{\omega D}. \quad (5.23)$$

Выражение в первых скобках  $u_i^{\omega D} - k_s^{\omega} u_j^{\omega D}$  интерпретируется как разность между ценой  $u_i^{\omega D}$ , которую платит  $s$ -й элемент за единицу водных ресурсов, поступающих ему из  $i$ -го створа, и ценой  $k_s^{\omega} u_j^{\omega D}$  которую платит ВХС  $s$ -му элементу за возврат  $v$ -й створ единицы водных ресурсов. Коэффициент  $k_s^{\omega}$  показывает, какую часть забираемой воды элемент возвращает. Вторая скобка оценивает удельное изменение величины гарантированного водопользования.

При выполнении гипотезы слабого влияния (отсутствия монопольного эффекта) назначение цен по правилу (5.23) приводит к согласованному принятию решений центром и элементами ВХС. Суть гипотезы в том, что изменяя функцию предпочтения  $q_s(W)$ , сообщаемую центру, элемент не может существенно повлиять на цену  $c_s^D$  [Бурков, 1977]. Цена определяется двойственными оценками, зависящими от функций предпочтения всех элементов, на которые элемент повлиять не может. Поэтому, сообщая функцию предпочтения, элемент не учитывает ее влияния на цену, по которой ему будут выделяться водные ресурсы.

Гипотеза слабого влияния, которая отражает слабое воздействие отдельного элемента на общие для всей системы показатели управления, выполнена обычно при большом числе элементов ВХС. Обоснование справедливости этой гипотезы, основанное на рассмотрении влияния возмущений исходных данных на решения задач, обладающих свойствами задачи D (выпуклость целевой функции, сетевая структура допустимого множества и линейность ограничений величин потоков), приведено в [Бурков и др., 1990].

Равенства и неравенства (5.21) является условиями минимума функций

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_s(w_s) &= \varphi_s(w_s) + C_s^D = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega [\varphi_s^\omega(w_s^\omega) + c_s^{\omega D}] = \\ &= \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega [\varphi_s^\omega(w_s^\omega) + [u_i^{\omega D} - k_s^\omega u_j^{\omega D}] x_s^\omega + [\bar{\Lambda}_s^D - \underline{\Lambda}_s^D] X_s] \end{aligned} \quad (5.24)$$

Значения этих функций зависят только от информации, сообщаемой в центр элементами, так как в силу выполнения гипотезы слабого влияния отдельные элементы не могут воздействовать на цены водных ресурсов. Поэтому при реализации механизма открытого управления, руководствуясь которым центр каждому элементу выделяет водные ресурсы в соответствии с решением задачи D, обеспечивающим минимум оценки (5.24) целевой функции каждого элемента, предпочтительной стратегией всех элементов является сообщение истинных функций затрат. Они будут сообщать центру достоверную информацию об эффективности использования водных ресурсов, т. е.  $\varphi_s(w_s) = f_s(w_s)$ . Таким образом, процедура распределения водных ресурсов в результате решения базовой задачи D и назначения цен на воду по правилу (5.23) является механизмом открытого управления, при котором достигается совершенное согласование целей ВРС и ее элементов.

#### 5.4. Управление качеством водных ресурсов

В согласовании интересов центра и пользователей при управлении качеством водных ресурсов реализуется тот же принцип открытого управления, что и при рациональном их использовании. Отличие состоит в присутствии в базовой модели разнородных взаимодействующих потоков, соответствующих различным видам примесей.

Е<sub>0</sub> определение вектора потоков  $Q^0 = Y^0, Z^0, y^0, z^0$  Базовая модель управления качеством водных ресурсов описывается задачей составляющие которого векторы соответствуют гарантированным величинам масс примесей на входах и выходах

$Y^0 = \{Y_{sl}^0 | l \in L, s \in S\}$ ,  $Z^0 = \{Z_{sl}^0 | l \in L, s \in S\}$  и их реализуемым значениям

$y^0 = \{y_{sl}^{\omega 0} | l \in L, s \in S, \omega \in \Omega\}$ ,  $z^0 = \{z_{sl}^{\omega 0} | l \in L, s \in S, \omega \in \Omega\}$ . На векторе  $Q^0$  дости-

$$f(Q) = \sum_{s \in S} f_s(Q) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} f_s^\omega(Q_s^\omega), \quad (5.25)$$

оценивающей затраты, связанные с обеспечением требуемого качества водных ресурсов в предположении, что объемы используемых водных ресурсов фиксированы. Функция  $f(Q)$  - частный случай функции Д W), описанной выше (5.12). В ней отсутствуют переменные X, x, моделирующие количество водных ресурсов. Вектор  $Q^0$  принадлежит множеству  $G_E$ , выделяемому условиями (5.4)-(5.8), (5.10) и (5.11). Важно отметить, что в данной модели в ограничениях типа равенств

(5.11) величины  $x_s^{\omega}$  и  $x_s^{\omega}$  фиксированы; они выступают в роли положительных коэффициентов  $y_{sl}^{\omega}$  и  $v_{il}^{\omega}$ , поэтому  $B_{il}^{\omega}(y_l^{\omega}, x^{\omega})$  принимает вид  $B_{il}^{\omega}(y_l^{\omega})$ . Это предопределяет функцию ограничений (5.11) в задаче  $E_o$ . Вектором  $Q$  описывается оптимальное содержание примесей в воде и, следовательно, ее качество.

Центр заинтересован в решении задачи  $E_o$ . Однако информацией об истинных функциях затрат функция почтения, сообщаемые элементами

он не обладает. Ему известны функции пред-  
 $\varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega})$  (Функции  $(\varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega}))_s(Q_s^{\omega})$ ),  $f_s^{\omega}(Q_s^{\omega})$ : должны правдопо-  
 при

выпуклые. Они так же, как  
 должно оценивать затраты, связанные с использованием водных ресурсов и их очисткой. Вместо задачи  $E_o$  центр решает некоторую другую задачу  $E$ , допустимое множество которой  $G_E$  совпадает с допустимым множеством задачи  $E_o$ , а в качестве целевой выступает функция

$$\varphi(Q) = \sum_{s \in S} \varphi_s(Q_s) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{s \in S} \varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega}). \quad (5.27)$$

вающие искажение информации  $\psi_s^{\omega}(Q_s^{\omega}) \equiv 0$ . Семейство задач  $\{E\}$  включает также задачу  $E_o$ , в которой

функции, описы-

Задачи  $E$  - двухэтапные задачи стохастического программирования. Стратегическими переменными первого этапа выступают потоки  $Y, Z$  на входах и выходах дуг сети  $F(J, S)$ , соответствующие гарантированным величинам масс примесей, поступающих пользователям, на участки рек и каналов  $y_s^{\omega}, z_s^{\omega}$  моделирующей и отводимым от них.

Тактическими переменными второго этапа являются потоки  $x_{sl}^{\omega}$  реализуемые значения масс примесей. В задачах  $E$  определяется минимум выпуклых функций  $\varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega})$  на выпуклом множестве, выделяемом линейными ограничениями. В них существуют седловые точки функции Лагранжа

$$L_E = \varphi(Q) + \Theta_{EL} + \Theta_{Ev}, \quad (5.28)$$

$$\text{где } \Theta_{EL} = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{l \in L} \left[ \sum_{i \in J} \left[ v_{il}^{\omega} H_{il}^{\omega}(y_{il}^{\omega}, z_{il}^{\omega}) + \beta_{il}^{\omega} B_{il}^{\omega} \right] + \sum_{s \in S_I} \alpha_{sl}^{\omega} h_{sl}^{\omega}(y_{sl}^{\omega}, z_{sl}^{\omega}) + \sum_{s \in S} \left[ \mu_{sl}^{\omega} [x_{sl}^{\omega} - y_{sl}^{\omega}] + M_{sl}^{\omega} [z_{sl}^{\omega} - z_{sl}^{\omega}] \right] \right],$$

$$\Theta_{Ev} = \sum_{s \in S} \sum_v \left[ p^{\omega} \sum_{\omega \in \Omega} \left[ \bar{\mu}_{sv}^{\omega} r_{sv}^{\omega}(y_{sv}^{\omega}) + \bar{M}_{sv}^{\omega} r_{sv}^{\omega}(z_{sv}^{\omega}) \right] + \bar{\pi}_{sv} \underline{R}_{sv}(Y_{sv}) + \bar{\pi}_{sv} \bar{R}_{sv}(Y_{sv}) + \bar{\Pi}_{sv} \underline{R}_{sv}^k(Z_{sv}) + \bar{\Pi}_{sv} \bar{R}_{sv}^k(Z_{sv}) \right].$$

Здесь потенциалы вершин  $v_{il}^{\omega}$  имеют смысл дифференциальных экономических оценок масс примесей, содержащихся в водных ресурсах. Они оценивают затраты, обусловленные дополнительными единицами масс примесей в створах ВХС.

Двойственные переменные  $\alpha_{sl}^{\omega}$  оценивают влияние трансформации примесей в водных объектах на затраты в ВХС. Неотрицательные двойственные переменные  $\mu_{sl}^{\omega}, \bar{\mu}_{sl}^{\omega}, \underline{M}_{sl}^{\omega}, \bar{M}_{sl}^{\omega}, \underline{\pi}_s, \bar{\pi}_s, \underline{\Pi}_s$  и  $\bar{\Pi}_s$  оценивают требования, предъявляемые к качеству водных ресурсов. Они отличны от нуля, если для их удовлетворения требуются мероприятия, связанные с затратами.

Существование седловой точки функции Лагранжа  $J_{\omega}$  означает, что оптимальные значения переменных задачи E и ей двойственной связаны соотношениями, включающими условия оптимальности

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega E})}{\partial y_{sl}^{\omega}} - v_{il}^{\omega E} + \beta_{il}^{\omega E} / x_s^{\omega} - A_s^{l\omega} \alpha_{sl}^{\omega E} - \underline{\mu}_{sl}^{\omega E} + d_{sl} \bar{\mu}_{sv}^{\omega E} = 0, \\ \frac{\partial \varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega E})}{\partial z_{sl}^{\omega}} + v_{jl}^{\omega E} + \alpha_{sl}^{\omega E} - \underline{M}_{sl}^{\omega E} + d_{sl}^k \bar{M}_{sv}^{\omega E} = 0, \end{cases} \quad s \in S_I;$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega E})}{\partial y_{sl}^{\omega}} - v_{il}^{\omega E} + \beta_{il}^{\omega E} / x_s^{\omega} - \underline{\mu}_{sl}^{\omega E} + d_{sl} \bar{\mu}_{sv}^{\omega E} = 0, \\ \frac{\partial \varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega E})}{\partial z_{sl}^{\omega}} + v_{jl}^{\omega E} + \alpha_{sl}^{\omega E} - \underline{M}_{sl}^{\omega E} + d_{sl}^k \bar{M}_{sv}^{\omega E} = 0, \end{cases} \quad s \in S_{II}; \quad (5.29)$$

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_{sl}^{\omega E} [y_{sl}^{\omega} - y_{sl}^{\omega E}] &= \bar{\mu}_{sv}^{\omega E} r_{sv}^{\omega} (y_{sv}^{\omega E}) = \underline{M}_{sl}^{\omega E} [z_{sl}^{\omega} - z_{sl}^{\omega E}] = \bar{M}_{sv}^{\omega E} r_{sv}^{k\omega} (z_{sv}^{\omega E}) = \\ &= \underline{\pi}_{sv}^E R_{sv} (Y_{sv}^E) = \bar{\pi}_{sv}^E \bar{R}_{sv} (Y_{sv}^E) = \underline{\Pi}_{sv}^E R_{sv}^k (Z_{sv}^E) = \bar{\Pi}_{sv}^E \bar{R}_{sv}^k (Z_{sv}^E) = 0, \end{aligned}$$

$$s \in S, l \in L_v \subset L.$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \frac{\partial \varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega E})}{\partial Z_{sl}} - \tilde{d}_{sl}^k \underline{\Pi}_s^E + \tilde{d}_{sl}^k \bar{\Pi}_s^E = 0, \quad (5.30)$$

В согласовании стратегий управления качеством водных ресурсов участвуют пользователи, имеющие возможность этим качеством управлять. В модели они представлены дугами множества  $S_{\omega}$ , изображающими пользователей с очистными сооружениями. Поэтому ниже рассматриваются условия оптимальности в наглядной форме только для потоков дуг этого множества. Они получаются из соотношений (5.29) при исключении из них переменных, удовлетворяющих условиям дополняющей нежесткости (5.30),

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{\partial \varphi_s^\omega(Q_s^{\omega E})}{\partial y_{sl}^\omega} \geq v_{il}^{\omega E} - \beta_{il}^{\omega E} / x_s^\omega, \text{ при } y_s^\omega = y_s^{\omega E}; \text{ "=" } \succ y_s^\omega < y_s^{\omega E} \\
\text{и } r_{sv}^\omega(y_{sv}^{\omega E}) < 0; \text{ "≤"} \succ r_{sv}^\omega(y_{sv}^{\omega E}) = 0; \\
\frac{\partial \varphi_s^\omega(Q_s^{\omega E})}{\partial z_{sl}^\omega} \geq -v_{jl}^{\omega E}, \succ z_{sl}^\omega = z_{sl}^{\omega E}; \text{ "=" } \succ z_{sl}^\omega < z_{sl}^{\omega E} \text{ и } r_{sv}^\omega(z_{sv}^{\omega E}) < 0; \\
\text{"≤"} \succ r_{sv}^{k\omega}(z_{sv}^{\omega E}) = 0; \\
\frac{\partial \varphi_s(Q_s^E)}{\partial Y_{sl}} = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \frac{\partial \varphi_s^\omega(Q_s^{\omega E})}{\partial Y_{sl}} \leq 0, \succ R_{sv}(Y_{sv}^E) = 0; \text{ "=" } \succ \\
\text{">"} R_{sv}(Y_{sv}^E) < 0 \text{ и } \bar{R}_{sv}(Y_{sv}^E) < 0; \text{"≥"} \succ \bar{R}_{sv}(Y_{sv}^E) = 0; \\
\frac{\partial \varphi_s(Q_s^E)}{\partial Z_{sl}} = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \frac{\partial \varphi_s^\omega(Q_s^{\omega E})}{\partial Z_{sl}} \leq 0, \succ R_{sv}(Z_{sv}^E) = 0; \\
\text{"=" } \succ R_{sv}(Z_{sv}^E) < 0 \text{ и } \bar{R}_{sv}(Z_{sv}^E) < 0; \text{"≥"} \succ \bar{R}_{sv}(Z_{sv}^E) = 0.
\end{array} \right. \quad (5.31)$$

Назначением цен центр добивается требуемого качества воды в водоемах, выделяя пользователям допустимые величины масс примесей, которые соответствуют координатам оптимального вектора  $Q^E$  задачи E. Пользователи распоряжаются этими ресурсами наилучшим образом, решая свои (локальные) задачи, минимизируя свои функции затрат

$$f_s(Q_s) + C_s^E, \quad s \in S_{II}, \quad (5.32)$$

где  $C_s^E$  — цена, которую платит  $s$ -й элемент за качество водных ресурсов.

Цены  $C_s^E$  формируются оптимальными двойственными переменными задач

$$\begin{aligned}
c_{sl}^{\omega E} &= v_{jl}^{\omega E} z_{sl}^\omega - [v_{il}^{\omega E} - \beta_{il}^{\omega E} / x_s^\omega] y_{sl}^\omega + \tilde{d}_{sl} [\pi_{sv}^E - \bar{\pi}_{sv}^E] y_{sl} + \tilde{d}_{sl}^k [\bar{\pi}_{sv}^E - \underline{\pi}_{sv}^E] z_{sl}, \\
C_s^E &= \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{l \in L} c_{sl}^{\omega E}.
\end{aligned}$$

E, которые удовлетворяют условиям (31), по правилу

$$(5.33)$$

Первые два слагаемые в (5.33) представляют собой разность между ценой, которую платит  $s$ -й элемент за сброс  $l$ -й примеси в  $v$ -й створ, и ценой, которую платит ВХС 5-му элементу за поступающую ему примесь из  $g$ -го створа. Третье слагаемое оценивает влияние требований, предъявляемых элементом к гарантированным значениям масс примесей, поступающих к нему. Четвертое слагаемое соответствует цене, которую платит элемент за гарантированную величину масс примесей, поступающих от него.

Соотношения (5.31) представляют собой условия минимума функций цели пользователей с

$$\tilde{\varphi}_s(Q_s) = \varphi_s(Q_s) + C_s^E = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega [\varphi_s^\omega(Q_s^\omega) + c_s^{\omega E}], \quad s \in S_{II} \quad \text{очистными сооружениями} \quad (5.34)$$

на множествах, выделяемых ограничениями (5.5)-(5.8).

В силу выполнения гипотезы слабого влияния цены  $c_s^E$ , назначаемые элементам, не зависят от информации, сообщаемой в центр. Поэтому при назначении  $Q_s^E$ , являющегося решением задачи E, доминантной стратегией элементов является сообщение истинных элементам плана поступления и Тем самым достигается совершенное соглашение отведения примесей функций затрат, т.е.  $\varphi_s(Q_s) = f_s(Q_s)$ . сование целей ВРС и ее элементов.

### 5.5. Рациональное использование водных ресурсов и управление их качеством

Согласование стратегий центра и пользователей при рациональном использовании водных ресурсов и управлении их качеством основывается так же, как и в двух выше рассмотренных случаях, на принципе открытого управления. Этот процесс выработки стратегий управления ВХС, включающий как частные случаи процедуры использования водных ресурсов без учета их качества и управления качеством водных ресурсов при закреплённом их количестве, принципиально отличается от них. Его базовая модель описывается задачей невыпуклого программирования. В ней возможно существование локальных экстремумов, не совпадающих с глобальным, и, следовательно, отсутствие необходимых и достаточных условий оптимальности, аналогичных (5.19)—(5.20) и (5.29)-(5.30). Поэтому согласование интересов центра и пользователей, в котором центр стимулирует поведение пользователей, управляя ценами, достигается с погрешностью, в отличие от выше рассмотренных случаев, где согласование получается совершенным.

Базовая модель рационального использования водных ресурсов и управления их качеством описывается задачей Go определения вектора потоков  $W^0$ , составляющие которого - векторы, соответствующие объемам водных ресурсов  $x^0$  и массам содержащихся в них примесей  $y^0$  и  $z^0$ , а также их гарантированным значениям  $X^0, Y^0, Z^0$ , описанным выше. Вектор  $W^0$  принадлежит множеству GG, выделяемому условиями (5.2)—(5.11), и минимизирует на нем функцию  $f(W)$ , оценивающую затраты, связанные с функционированием ВРС.

Центр, заинтересованный в выделении ресурсов, величины которых соответствуют оптимальным векторам задачи Go, информацией о действительных функциях затрат элементов не обладает. Ему известны функции предпочтения, сообщаемые элементами

(5.35)

$$\varphi_s^0(W_s^0) = f_s^0(W_s^0) + \psi_s^0(W_s^0),$$

которые должны правдоподобно оценивать затраты водопользования и водоотведения. Они принадлежат тому же классу функций что и

$$f_s^0(W_s^0).$$

Вместо задачи  $G_0$  центр решает некоторую задачу  $G$ , допустимое множество которой  $G_G$  совпадает с допустимым множеством задачи  $G_0$ , а целевой является функция

$$\varphi(W) = \sum_{s \in S} \varphi_s(W_s) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} \varphi_s^\omega(W_s^\omega). \quad (5.36)$$

Семейство задач  $\{G\}$  содержит также задачу  $G_0$ , в которой функции искаже-

$$\psi_s^\omega(W_s^\omega) \equiv 0.$$

ния информации

Задачи  $G$  состоят в минимизации невыпуклых, вообще говоря, функций  $\varphi(W)$

на невыпуклом, из-за нелинейности ограничений типа равенства (5.11) множестве  $G_0$ . Эти задачи многоэкстремальные. Общих методов решения таких задач не существует. Однако специфика задач  $G$ , заключающаяся в обобщенной сепарабельности целевых функций, т.е. представимости их в виде суммы функций, каждая из которых зависит от небольшого числа переменных, и билинейности ограничений (5.11), дает возможность построить метод их решения. В этом методе нахождение оптимальных векторов задач  $G$  сводится к решению конечной последовательности задач выпуклого программирования, формирование которых основано на построении выпуклых оболочек отдельных слагаемых функций цели и ограничений на системе сужающихся прямоугольных множеств. Этот метод, подробно описанный в [Хранович, 2001], является детализацией схемы ветвей и границ для решения многоэкстремальных задач [Лазебник и др., 1981]. В резуль-

тате применения этого  $\varepsilon, \delta$ -приближенное решение метода получается

$$\tilde{W} = \tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$$

от оптимального не более, чем на заданную погрешность  $\varepsilon > 0$ ,

задачи  $G$  на котором значение целевой функции

$$\varphi(\tilde{W}) - \min_{W \in G} \varphi(W) \leq \varepsilon. \quad (5.37)$$

Вектор  $W$  принадлежит множеству, отличающемуся от допустимого множества  $G_G$  задачи  $G$  требованием выполнения ограничений (5.11) с погрешностями, не превосходящими  $\delta_i > 0$ . Такое расширенное понимание допустимого множества эквивалентно замене каждого из ограничений (5.11) двумя неравенствами

$$y_{s\hat{l}}^\omega x_{\hat{s}}^\omega - y_{\hat{s}l}^\omega x_s^\omega \leq \delta_i \text{ и } y_{\hat{s}l}^\omega x_s^\omega - y_{s\hat{l}}^\omega x_{\hat{s}}^\omega \leq \delta_i, \quad s, \hat{s} \in S_i^-, i \in J, \omega \in \Omega, l \in L. \quad (5.38)$$

Вектор  $W$ , удовлетворяющий условиям (5.37) и (5.38), получается как оптимальный вектор «последней» оценочной задачи итерационного процесса указанного метода. Задача  $G$ , порождающая  $\varepsilon, \delta$ -оптимальное решение исходной базовой задачи  $G$ , состоит в определении вектора  $w$ , минимизирующего функцию

$$\tilde{\varphi}(W) = co \varphi(W) = \sum_{s \in S} \tilde{\varphi}_s(W_s) = \sum_{s \in S} \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega co \varphi_s^\omega(W_s^\omega), \quad (5.39)$$

где:  $co \varphi_N$  и  $co \varphi_{N_s}^{\omega}$  - выпуклые оболочки функций  $\varphi$  и  $\varphi_s^{\omega}$  на множествах  $N$  и  $N_s^{\omega}$ ,  
множество  $N$  - декартово  $N_s^{\omega}, N = \bigotimes_{\omega \in \Omega} \bigotimes_{s \in S} N_s^{\omega}$ , множества  
произведение множеств  $N_s^{\omega}$  прямоугольные параллелепипеды, стороны которых представляют собой

$$\begin{aligned} N_s^{\omega}(x_s^{\omega}) &= \left\{ x_s^{\omega} \mid \underline{\tilde{x}}_s^{\omega} \leq x_s^{\omega} \leq \overline{\tilde{x}}_s^{\omega} \right\}, \quad N_s(X_s) = \left\{ X_s \mid \underline{\tilde{X}}_s \leq X_s \leq \overline{\tilde{X}}_s \right\}, \\ N_s^{\omega}(y_{sl}^{\omega}) &= \left\{ y_{sl}^{\omega} \mid \underline{\tilde{y}}_{sl}^{\omega} \leq y_{sl}^{\omega} \leq \overline{\tilde{y}}_{sl}^{\omega} \right\}, \\ N_s(Y_{sl}) &= \left\{ Y_{sl} \mid \underline{\tilde{Y}}_{sl} \leq Y_{sl} \leq \overline{\tilde{Y}}_{sl} \right\}, \quad N_s^{\omega}(z_{sl}^{\omega}) = \left\{ z_{sl}^{\omega} \mid \underline{\tilde{z}}_{sl}^{\omega} \leq z_{sl}^{\omega} \leq \overline{\tilde{z}}_{sl}^{\omega} \right\}, \\ N_s(Z_{sl}) &= \left\{ Z_{sl} \mid \underline{\tilde{Z}}_{sl} \leq Z_{sl} \leq \overline{\tilde{Z}}_{sl} \right\}. \end{aligned} \quad (5.40)$$

Вектор  $W$  принадлежит допустимому множеству задачи  $G$ , которое выделяется условиями (5.2)–(5.10), дополненными требованиями принадлежности этого вектора параллелепипеду  $N$ , определяемому соотношениями (5.40) и неравенствами, образованными выпуклыми оболочками левых частей соотношений (5.38)

$$\begin{cases} B_{il}^{\omega-} = co_{N_{il}^{\omega}}(y_{sl}^{\omega} x_{\hat{s}}^{\omega} - y_{\hat{s}l}^{\omega} x_s^{\omega}) = co_{N_{sl}^{\omega}} y_{sl}^{\omega} x_{\hat{s}}^{\omega} + co_{N_{\hat{s}l}^{\omega}} [-y_{\hat{s}l}^{\omega} x_s^{\omega}] \leq 0, \\ B_{il}^{\omega+} = co_{\hat{N}_{il}^{\omega}}(y_{\hat{s}l}^{\omega} x_s^{\omega} - y_{sl}^{\omega} x_{\hat{s}}^{\omega}) = co_{\hat{N}_{sl}^{\omega}} y_{\hat{s}l}^{\omega} x_s^{\omega} + co_{\hat{N}_{\hat{s}l}^{\omega}} [-y_{sl}^{\omega} x_{\hat{s}}^{\omega}] \leq 0, \quad s, \hat{s} \in S_i^-, \end{cases} \quad (5.41)$$

где  $N_{sl}^{\omega} = N_s^{\omega}(y_{sl}^{\omega}) \otimes N_s^{\omega}(x_{\hat{s}}^{\omega})$ ,  $\hat{N}_{sl}^{\omega} = N_s^{\omega}(y_{\hat{s}l}^{\omega}) \otimes N_s^{\omega}(x_s^{\omega})$ ,  $N_{il}^{\omega} = N_{sl}^{\omega} \otimes \hat{N}_{sl}^{\omega}$ .

Задача  $Q$  состоит в минимизации выпуклой функции (5.39) на выпуклом множестве  $G$ , которое выделяется наряду с линейными соотношениями (5.2)–(5.10) также выпуклыми ограничениями (5.41), по построению содержащими внутреннюю точку. Поэтому существует седловая точка функции Лагранжа этой задачи [Бурков и др., 1980]

$$L_{\tilde{G}} = \tilde{\varphi}(W) + \Theta_D + \Theta_E + \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{i \in J} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S_i^-} [\beta_{il}^{\omega+} B_{il}^{\omega+} + \beta_{il}^{\omega-} B_{il}^{\omega-}]. \quad (5.42)$$

Слагаемые  $\Theta_D$ ,  $\Theta_{El}$  и  $\Theta_{Ev}$  описаны выше ((5.18) и (5.28)). Входящие в них двойственные переменные имеют тот же смысл, что в задачах D и E. Неотрицательные двойственные переменные оценивают влияние нарушения условий (5.11).

Из существования седловой точки функции Лагранжа  $L_{\tilde{G}}$  следует, что оптимальные векторы задач  $Q$  и им двойственных связаны условиями оптимальности

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial x_s^\omega} + \sum_\nu [\bar{\mu}_{s\nu}^{\omega\tilde{G}} - k_s^\omega \bar{M}_{s\nu}^{\omega\tilde{G}}] + \bar{\lambda}_s^{\omega\tilde{G}} - \underline{\Lambda}_s^{\omega\tilde{G}} + u_i^{\omega\tilde{G}} - k_s^\omega u_j^{\omega\tilde{G}} + \delta_{sx}^{\omega\tilde{G}} = 0, \quad s \in S, \\
\frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial y_{sl}^\omega} - \underline{\mu}_{sl}^{\omega\tilde{G}} + d_{sl} \bar{\mu}_{s\nu}^{\omega\tilde{G}} - v_{il}^{\omega\tilde{G}} - A_s^{ll\omega} \alpha_{sl}^{\omega\tilde{G}} + \delta_{syl}^{\omega\tilde{G}} = 0, \\
\frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial z_{sl}^\omega} - \underline{M}_{sl}^{\omega\tilde{G}} + \bar{M}_{s\nu}^{\omega\tilde{G}} + v_{jl}^{\omega\tilde{G}} + \alpha_{sl}^{\omega\tilde{G}} = 0, \quad s \in S_I, l \in L_\nu \subset L, \\
\frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial y_{sl}^\omega} - \underline{\mu}_{sl}^{\omega\tilde{G}} + d_{sl}^k \bar{\mu}_{s\nu}^{\omega\tilde{G}} - v_i^{\omega\tilde{G}} + \delta_{sxl}^{\omega\tilde{G}} = 0, \\
\frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial z_{sl}^\omega} - \underline{M}_{s\nu}^{\omega\tilde{G}} + d_{sl}^k \bar{M}_{s\nu}^{\omega\tilde{G}} + v_i^{\omega\tilde{G}} = 0, \quad s \in S_{II}, l \in L_\nu \subset L, \\
\sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial X_s} - \underline{\Lambda}_s^{\tilde{G}} + \bar{\Lambda}_s^{\tilde{G}} = 0, \\
\sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial Y_s} - \tilde{d}_{sl} \underline{\pi}_s^{\tilde{G}} + \tilde{d}_{sl} \bar{\pi}_s^{\tilde{G}} = 0, \quad l \in L_\nu, \\
\sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial Z_s} - \tilde{d}_{sl}^k \underline{\Pi}_s^{\tilde{G}} + \tilde{d}_{sl}^k \bar{\Pi}_s^{\tilde{G}} = 0, \quad l \in L_\nu,
\end{array} \right. \quad (5.43)$$

где  $\delta_{sx}^{\omega\tilde{G}} = \sum_{l \in L} \left[ \beta_{il}^{\omega+} \frac{\partial B_{il}^{\omega+}}{\partial x_s^\omega} + \beta_{il}^{\omega-} \frac{\partial B_{il}^{\omega-}}{\partial x_s^\omega} \right]$ ,  $\delta_{syl}^{\omega\tilde{G}} = \beta_{il}^{\omega+} \frac{\partial B_{il}^{\omega+}}{\partial y_{sl}^\omega} + \beta_{il}^{\omega-} \frac{\partial B_{il}^{\omega-}}{\partial y_{sl}^\omega}$ , а также усло-

виями дополнительной нежесткости, включающими соотношения, аналогичные (5.20) и (5.30), а также

$$\beta_{il}^{\omega+} B_{il}^+ + \beta_{il}^{\omega-} B_{il}^- = 0.$$

При исключении из условий оптимальности (5.43) значений двойственных переменных, удовлетворяющих условиям дополнительной нежесткости, получаются условия оптимальности в наглядной форме

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial x_s^\omega} \leq \Delta_{xs}^{\omega\tilde{G}} \succ x_s^{\omega\tilde{G}} = \underline{x}_s^\omega; \text{"="} \succ x_s^\omega < x_s^{\omega\tilde{G}} < \bar{x}_s^\omega \text{ u "}\geq\text{"} \succ x_s^{\omega\tilde{G}} = \bar{x}_s^\omega;$$

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial X_s} = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial X_s} \leq 0, \succ X_s^{\tilde{G}} = \underline{X}_s; \text{"="} \succ \underline{X}_s < X_s^{\tilde{G}} < \bar{X}_s; \text{"}\geq\text{"} \succ X_s^{\tilde{G}} = \bar{X}_s;$$

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial y_{sl}^\omega} \geq \Delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}} \succ y_{sl}^{\omega\tilde{G}} = \underline{y}_{sl}^\omega; \text{"="} \succ \underline{y}_{sl}^{\omega\tilde{G}} < y_{sl}^{\omega\tilde{G}} < \bar{y}_{sl}^{\omega\tilde{G}}; \text{"}\leq\text{"} \succ y_{sl}^{\omega\tilde{G}} = \bar{y}_{sl}^{\omega\tilde{G}};$$

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega}{\partial Y_{sl}} = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial Y_{sl}} \leq 0 \succ Y_{sl}^{\tilde{G}} = \underline{Y}_{sl}; \text{"="} \succ \underline{Y}_{sl} < Y_{sl}^{\tilde{G}} < \bar{Y}_{sl}; \text{"}\geq\text{"} \succ Y_{sl}^{\tilde{G}} = \bar{Y}_{sl};$$

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial z_{sl}^\omega} \geq -v_{jl}^{\omega\tilde{G}} \succ z_{sl}^{\omega\tilde{G}} = \underline{z}_{sl}^\omega; "=" \succ \underline{z}_{sl}^{\omega\tilde{G}} < z_{sl}^{\omega\tilde{G}} < \bar{z}_{sl}^{\omega\tilde{G}}; "<" \succ z_{sl}^{\omega\tilde{G}} = \bar{z}_{sl}^{\omega\tilde{G}};$$

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}_s}{\partial Z_{sl}} = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \frac{\partial \tilde{\varphi}_s^\omega(W_s^{\omega\tilde{G}})}{\partial Z_{sl}} \leq 0, \succ Z_{sl}^{\tilde{G}} = \underline{Z}_{sl};$$

$$"=" \succ \underline{Z}_{sl} < Z_{sl}^{\tilde{G}} < \bar{Z}_{sl}; ">" \succ Z_{sl}^{\tilde{G}} = \bar{Z}_{sl},$$

$$\text{где } \Delta_{xs}^{\omega\tilde{G}} = u_i^{\omega\tilde{G}} - k_s^\omega u_j^{\omega\tilde{G}} - \sum_v \left[ k_s^\omega \bar{M}_{sv}^{\omega\tilde{G}} - \bar{\mu}_{sv}^{\omega\tilde{G}} \right] + \delta_{sx}^{\omega\tilde{G}},$$

$$\Delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}} = v_{il}^{\omega\tilde{G}} + A_s^{ll\omega} \alpha_{sl}^{\omega\tilde{G}} - \delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}}, s \in S_I, \Delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}} = v_{il}^{\omega\tilde{G}} - \delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}}, s \in S_{II}.$$

Центр выделяет пользователям водные ресурсы и назначает поступающие и отводимые массы примесей в соответствии с решением задачи  $Q$  и назначает цены, сформированные оптимальными двойственными переменными этой задачи в виде

$$c_s^{\omega\tilde{G}} = \Delta_{xs}^{\omega\tilde{G}} x_s^\omega + \sum_{l \in L} \left[ v_{jl}^{\omega\tilde{G}} z_{sl}^\omega - \Delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}} y_s^\omega \right] + \left[ \bar{\Lambda}^{\tilde{G}} - \underline{\Lambda}^{\tilde{G}} \right] X_s +$$

$$+ \sum_v \sum_{l \in L_v} \left[ \tilde{d}_{sl}^k \left[ \bar{\pi}_{sv}^{\tilde{G}} - \underline{\pi}_{sv}^{\tilde{G}} \right] y_{sl} + \tilde{d}_{sl}^k \left[ \bar{\pi}_{sl}^{\tilde{G}} - \underline{\pi}_{sl}^{\tilde{G}} \right] z_{sl} \right], \quad (5.45)$$

$$\Delta_{xs}^{\omega\tilde{G}} = u_i^{\omega\tilde{G}} - k_s^\omega u_j^{\omega\tilde{G}} - \sum_v \left[ k_s^\omega \bar{M}_{sv}^{\omega\tilde{G}} - \bar{\mu}_{sv}^{\omega\tilde{G}} \right] + \delta_{sx}^{\omega\tilde{G}}$$

Удельная стоимость поступающих пользователям водных ресурсов

складывается из разности между це-

$$\delta_{sx}^{\omega\tilde{G}} = \sum_{l \in L} \left[ \beta_{il}^{\omega+} \frac{\partial B_{il}^{\omega+}}{\partial x_s^\omega} + \beta_{il}^{\omega-} \frac{\partial B_{il}^{\omega-}}{\partial x_s^\omega} \right] \text{ пающих водных ресурсов и ценой возврата час-}$$

нарушения равенства (5.11). Второе слагаемое оценок  $\mu_{sv}^{\omega\tilde{G}}$  и  $k_s^\omega \bar{M}_{sv}^{\omega\tilde{G}}$  единицы объема водных ресурсов для разбавления примесей на входе и выходе пользователя и оценки правой части равенства (5.45) представляет собой разность между ценой, которую платит  $l$ -й элемент за сброс примесей, и ценой, которую платит элементу ВХС за примеси, поступающие ему. Цена  $\Delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}}$  единицы массы  $l$ -й примеси,

5-му пользователю, равна

$v_{il}^{\omega\tilde{G}}$  на входе эле-

мента за вычетом оценки  $\delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}} = \beta_{il}^{\omega+} \frac{\partial B_{il}^{\omega+}}{\partial y_{sl}^\omega} + \beta_{il}^{\omega-} \frac{\partial B_{il}^{\omega-}}{\partial y_{sl}^\omega}$  нарушения равенства (5.11).

Кроме того, для элементов ВХС без очистных сооружений в образовании цены

единицы массы примесей присутствует слагаемое  $A_s^{ll\omega} \alpha_{sl}^{\omega\tilde{G}}$  оценивающее значимость трансформации  $l$ -й примеси в водном объекте.

Таким образом,

$$\Delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}} = v_{il}^{\omega\tilde{G}} - \delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}} \text{ для } s \in S_{II} \text{ и } \Delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}} = v_{il}^{\omega\tilde{G}} - \delta_{ysl}^{\omega\tilde{G}} + A_s^{ll\omega} \alpha_{sl}^{\omega\tilde{G}} \text{ для } s \in S_I. \text{ Интерпретация}$$

третьего, четвертого и пятого слагаемых правой части равенства (5.45) идентична их представлению при согласовании интересов центра и пользователей в случаях раздельного управления количеством и качеством водных ресурсов, рассмотренных выше.

Соотношения (5.44) представляют собой условия минимума функций цели пользователей при управлении количеством и качеством водных ресурсов

$$\tilde{\Phi}_s(W_s) = \tilde{\varphi}_s(W_s) + C_s^{\tilde{G}} = \sum p^{\omega} [\tilde{\varphi}_s^{\omega}(W_s^{\omega}) + c_s^{\omega\tilde{G}}], \quad (5.46)$$

где цены  $c_s^{\omega\tilde{G}}$  использования объемов водных ресурсов и отведения масс примесей определяются равенствами (5.45). Минимумы функций  $\phi(W)$  достигаются на множествах, выделяемых ограничениями (5.2), (5.3) и (5.5)-(5.8). Значения этих функций, как следует из гипотезы слабого влияния, зависят только от информации, сообщаемой в центр элементами системы. Проводя механизм открытого управления, центр выделяет объемы водных ресурсов и назначает величины поступления и отведения масс примесей, полученные в результате решения задачи

$G$ , обеспечивающего минимум оценок (5.46) целевых функций элементов ВХС. Поэтому элементы будут сообщать центру достоверную информацию об эффективности водопользования и водоотведения

$$\varphi_s^{\omega}(W_s^{\omega}) = f_s^{\omega}(W_s^{\omega}).$$

Таким образом, выделение пользователям объемов водных ресурсов, назначение величин поступления и отведения масс примесей при совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов в соответствии с решением базовой задачи  $G$  приводит к согласованию целей ВХС и ее отдельных элементов. Однако такое согласование достигается с погрешностью, с которой решение задачи  $Q$  аппроксимирует решение исходной базовой задачи  $G$ . Согласование интересов центра и элементов в этом общем случае отличается от их согласования при раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов, рассмотренных выше, в которых достигается совершенное согласование.

$$\Delta x^{\omega 0} = x^{\omega 0} - X$$

естественной монополии ВХС и пользователей. Регулятором взаимоотношений продавцов ресурсов - ВХС и покупателей - пользователей выступают цены за гарантированные поставки водных ресурсов и плата за отклонения от них.

Рынок водных ресурсов и, соответственно, система ценообразования на нем могут быть устроены по-разному. Наиболее простой для анализа вариант - жесткая, полностью регулируемая государством монополия. В этом случае государство устанавливает цены, исходя из своих интересов. В пользу такого подхода выдвигается весьма простая аргументация. Водные ресурсы являются государственной собственностью. Монополично распоряжается ими ВХС - представитель государства. Государство заинтересовано в установлении равноправных рыночных отношений между распорядителем-ВХС и пользователями. Для этого необходим регулирующий орган, ограничивающий усердие системы в получении сверхприбыли путем взвинчивания цен за пользование незаменимыми водными ресурсами. В основе представления регулирующего органа (т.е. государства) о «справедливых» ценах лежат решения задач, аналогичных задаче  $D_0$ , в частности, задачи E.

Цена  $C_s^1$  по которой система «продает»  $s$ -му пользователю выделяемую в соответствии с решением задачи E величину гарантированного водопользования  $X_s^0$ , определяется эффективностью использования ресурса  $f_s^1(X_s^0)$

$$C_s(X_s^0) = \alpha_s f_s^1(X_s^0) \quad \text{Целесообразно}$$

разно назначать где  $a$  - положительный коэффициент, меньше 1. Коэффициент  $a$  отражает часть получаемой  $s$ -м пользователем прибыли, которой он оплачивает гарантированное водопользование. Величина этого коэффициента назначается регулирующим органом, стремящимся согласовать интересы системы и пользователей.

Сложнее обстоит дело с решением проблемы назначения платы за отклонения величин текущих поставок ресурсов от их гарантированных величин.

Традиционным является маржиналистский подход к оценке изменений результатов производства и назначения цен при отклонениях значений спотовых поставок от величин форвардных контрактов. В нем реализуется принцип предельной полезности - оценки изменения результатов производства при бесконечно малом изменении количества используемого ресурса. В соответствии с этим подходом цена поставки дополнительной (сверх гарантируемой величины) или недопоставки каждой единицы водного ресурса является ценой «последней» планируемой к использованию единицы. В терминах задачи B цена, определяемая этим «последним» пользователем, при

рав-  $G_s^\omega = \partial f_s^{2\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}) / \partial x_s^\omega$  реализации стохастических условий со  $G_s^\omega$

. Назначаемая цена формируется из цен , напри-

$$G_s = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega G_s^\omega \quad \text{или} \quad G_s = \max_{\omega \in \Omega} G_s^\omega \quad \text{при} \quad x_s^{\omega 0} < X_s^0 \quad \text{и} \quad G_s = \min_{\omega \in \Omega} G_s^\omega \quad \text{при}$$

на мер, в виде

Этот подход корректен для линейных целевых функций, а также для  $x_s^{\omega 0} > X_s^0$ .

нелинейных при условии, что отклонения значений поставляемых объемов водных ресурсов от их гарантируемых величин незначительны. Функции ущербов пользователей  $f_s^\omega(X, x^\omega)$  выпуклые нелинейные [Данилов-Данильян, Хранович,

2007]. Величины реализуемых объёмов могут намного отличаться от их ориентиров. При таком подходе потери эффективности, обусловленные дефицитом ресурсов, значительно превосходят компенсацию, получаемую за их недопоставку. Оплата пользователем профицита водных ресурсов превосходит результат их использования. Не спасает дела

$$x_s^{\omega 0} < X_s^0 \quad x_s^{\omega 0} > X_s^0 \text{ умножение } G_s \text{ на некоторые коэффициенты - боль-}$$

шой при и малый - при так как отсутствуют объективные предпосылки выбора значений этих коэффициентов.

Предлагается назначать цены за недопоставку водных ресурсов и их поставку сверх гарантированных величин в соответствии с ценностью этих ресурсов при производстве продукции. В основном варианте ВХС платит пользователю за недопоставку каждой единицы водного ресурса по цене риска (усредненного ущерба)

$$r_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}) = [f_s^{\omega}(X_s^0, X_s^0) - f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0})]^+, \text{ где } [u]^+ = \max\{u; 0\},$$

$$C_s^-(X_s^0, x_s^0) = \sum_{\omega \in \Omega} P^{\omega} \cdot r_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}) / [X_s^0 - x_s^{\omega 0}]^+.$$

За поставку водных ресурсов сверх гарантированных значений пользователь оплачивает каждую единицу объёма по усредненной цене шанса её использования

$$d_s^{\omega}(X_s^0, x_s^0) = [f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}) - f_s^{\omega}(X_s^0, X_s^0)]^+,$$

$$C_s^+(X_s^0, x_s^0) = \sum_{\omega \in \Omega} P^{\omega} \cdot d_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}) / [x_s^{\omega 0} - X_s^0]^+.$$

В результате при реализации ( $\Delta x_s^{\omega} > 0$ ) стохастических условий  $\langle * \rangle$  пользователь за из-лишки водных ресурсов платит, а недостаток водных ресурсов ( $\Delta x_s^{\omega} < 0$ ) система компенсирует в виде платы

$$\varphi_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega}) = C_s^+(X_s^0, x_s^0) \Delta x_s^{\omega},$$

$$\Phi_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega}) = C_s^-(X_s^0, x_s^0) \cdot |\Delta x_s^{\omega}|$$

Для стимулирования стремлений пользователей использовать излишки водных ресурсов и систем минимизировать их дефициты регулирующему органу (центру) можно предложить назначать цены при отклонении объёмов поставляемых водных ресурсов от их гарантированных величин по наименьшему шансу и наибольшему ущербу единицы их использования

$$\bar{C}_s^+(X_s^0, x_s^0) = \min_{\omega \in \Omega} d_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}) / [x_s^{\omega 0} - X_s^0]^+ \text{ и}$$

$$\bar{C}_s^-(X_s^0, x_s^0) = \max_{\omega \in \Omega} r_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}) / [X_s^0 - x_s^{\omega 0}]^-.$$

При описанных денежных отношениях, в которых, наряду с платой за водные ресурсы, присутствует плата за невыполнение обязательств по их поставкам, ВХС и пользователи выступают как равноправные участники рынка ресурсов (насколько могут быть «равноправны» монополист и другие участники рынка).

Проблема согласования интересов центра и пользователей в условиях неопределённости, решаемая при назначении цен за ресурсы в маргиналистском подходе по правилам (5.23), (5.33) и (5.45), в данном случае облегчается. Пользовате-

лям, не склонным к рискам (хозяйственные субъекты именно такие), не выгодно искажать информацию об эффективности использования водных ресурсов. Назначение функций предпочтения, сообщаемых центру,

$$\varphi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) > f_s^\omega(X_s, x_s^\omega),$$

может повлечь увеличение значений гарантированного водопользования и связанного с этим увеличением показателей использования ресурсов в идеальных условиях. В этом случае отклонения величин поставляемых ресурсов

могут при-

от гаранти-

$$\omega \in \Omega$$

рованных значений при реализациях стохастических условий

вести к ущербам, значительно превышающим «дополнительную» эффективность

$$\varphi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) <$$

использования гарантированного водопользования. Назначение

$$f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$$

уменьшает величины ущербов, однако при этом также падает эффектив-

тивность гарантированного водопользования.

### 5.7. Функционирование регулируемого рынка водных ресурсов

Схема, при которой цены на рынке устанавливает регулирующий орган, уполномоченный государством проводить антимонопольную тарифную политику и согласовывать интересы ВХС и водопользователей, вооруженный моделями расчёта ценностных показателей (такой орган существует в России, это - Федеральное агентство по тарифам, ФАТ), может оказаться чрезмерно зарегулированной. Неточность оптимального решения, неизбежные отклонения заложенных в расчёты исходных данных от их реальных значений, отсутствие у регулирующего органа достоверной информации о водопользователях (это - свободные экономические агенты, которых нельзя обязать сообщать в центр технологическую и прочую имеющую отношение к делу информацию - кроме тех сведений, через которые осуществляется налоговый контроль) оставляют мало надежд на то, что цены, рассчитанные по моделям типа  $E$ ,  $G$  и  $D$ , будут адекватны целям государства. ВХС, не влияющая на цены, становится чисто бюрократической организацией со всеми вытекающими отсюда следствиями: тенденцией к «затратности», безразличием к повышению эффективности своей работы (фактически предполагается, что эта задача полностью передана регулирующему органу с его моделями), пренебрежением к потребностям водопользователя и т.д.

Альтернативой такой схеме является невмешательство государства в процесс ценообразования. Тогда ВХС выступает как хозяйственная организация - монополист на рынке воды и услуг водного хозяйства, а цены на эту продукцию становятся предметом договора между ВХС и водопользователями. Однако из-за монополизма продавца, как отмечалось выше, рынок здесь не подчиняется предпосылкам классической модели свободного рынка с совершенной конкуренцией и договорная цена не обретает регулярных свойств, характерных для цен массовых продуктов на свободном рынке. Рассмотрим некоторые схемы и ситуации, возможные на таком рынке.

Платежи по спотовой схеме в условиях гарантированного водопользования предполагают существование договорной цены за поставляемую воду  $q\{X\}$  (руб. за

куб.м). Если  $x=X$ , то водопользователь заплатит ВХС  $Q(X)=q(X)X$  руб. Сколько, однако, придется платить за кубометр, если  $x \neq X$ ? Это зависит от договора. Спотовая схема предполагает неизменную цену; заметим, что потребителю на рынке электричества, как правило, просто не нужно  $x > X$ . На рынке воды водопользователь может купить и больше  $X$ , но вряд ли согласится за ту же цену: скорее всего, он будет платить за дополнительный кубометр при  $x > X$  меньше, чем  $q(X)$ , пусть это будет  $s(Q)$ , причем при  $f > 0$  не только  $s(Q) < q(X)$ , но и  $ds(Q)/df < 0$ . Стоимость поставки при  $x > X$  в этом случае будет  $q(X)X + s(x-X) \cdot (x-X)$ . В принципе отказ от предположения  $x < X$  можно рассматривать как шаг от спотовой схемы в сторону форвардного контракта. Этот шаг, во всяком случае, согласуется с рассмотрением событий, возможных в противоположной ситуации.

При  $x < X$  спотовая схема предполагает сохранение цены  $q(X)$ , ВХС не несет ответственности за недопоставку относительно гарантированного объема (ориентира). При форвардном контракте объем  $X$  уже не ориентир, а обязательство поставщика. Таким образом, случай  $x < X$  по сути становится невозможным: поставщик при такой угрозе докупает (либо производит) недостающее с дополнительными издержками, которые безразличны потребителю: он платит свои  $q(X)X$  руб. за полную поставку независимо от того, во что обошлось поставщику выполнение его обязательства. Соответственно, каждая оказавшаяся «в дефиците» (т.е. добытая с дополнительными усилиями) единица продукции (например, кВт-ч электроэнергии) приносит поставщику не  $q(X)$  руб. дохода, а меньше, и тем меньше, чем больше этот дефицит. Обозначим  $K(x)$  «реальный» (т.е. за вычетом дополнительных затрат) доход ВХС от продажи объема  $x$  при  $x < X$  по форвардному контракту, средняя «доходность»  $k(x) = K(x)/x$ ,  $k(x) < q(x)$ .

Если дополнительное электричество можно купить у других производителей энергии, то дополнительную воду купить практически невозможно (а угроза  $x < X$  возникает при таком дефиците, который за сезон исправить физически нельзя, поскольку любая гидротехническая система строится больше сезона). Поэтому, казалось бы, форвардные контракты на рынке воды невозможны. Однако представляется, что возможны их аналоги. На рынке электричества при угрозе  $x < X$  производитель выплачивает разницу  $q(X) - Hx$  другому производителю, у которого докупает недостающее. Правомерно предположить, что на рынке воды при  $x < X$  некую аналогичную величину ВХС будет выплачивать недополучившему воду потребителю (за каждый недопоставленный кубометр воды). Надо только найти какой-либо показатель, который можно в этом случае использовать в роли  $k(x)$ . Очевидно, что он должен иметь прямую зависимость от потерь потребителя при недопоставках воды относительно гарантированного объема. Иными словами, при  $x < X$  ВХС будет поставлять воду потребителю по более низкой цене, нежели  $q(X)$ .

Это звучит неестественно, если судить только о выводе, без предшествующих рассуждений: в условиях дефицита - более низкая цена? Тем не менее, если строить «справедливую» систему, аналогичную форвардной, должно быть именно так: от «капризов погоды» должны страдать все, в том числе и «сидящая на дефиците» ВХС. Если благодаря таким капризам поставщик дефицита наживается, пока все

остальные терпят ущерб, это ещё хуже, чем ситуация с присвоением олигархами горной ренты, по праву принадлежащей (в значительной мере) государству как собственнику ресурсов. ВХС - монополист, это определяет для водопользователя трудности достижения подобного договора с ней (аналога форвардного контракта). Однако для того, в частности, и существуют антимонопольное законодательство, Федеральная антимонопольная служба и Федеральное агентство по тарифам, чтобы такие договоры были фактами в сферах, где проявляется естественный монополизм.

С целью недопущения эффектов, обусловливаемых естественным монополизмом, на регулируемом рынке воды гарантированные объёмы  $X$ , цены  $q, s$  и  $\kappa$  — предмет соглашения ВХС и водопользователей. Оценки платы за пользование водными ресурсами, расчёт которых описан в предыдущем разделе, - ориентиры для регулирующего государственного органа, который должен использовать такие оценки как начальные значения для торгов, результатом которых станут реальные договорные цены. Разумеется, регулирующий орган будет назначать не только такие начальные значения, но и допустимые отклонения от них. Расчёт этих отклонений производится с учётом неточности решения задач E, G и D, неполноты исходной информации и пр.

Подобная схема в максимально возможной степени симметризует отношения ВХС и водопользователей, в настоящее время весьма далекие от предполагаемого рынком равноправия.

## 5.8. Заключение

Рассмотрено согласование стратегий водопользования управляющего органа ВХС (центра) и водопользователей - активных элементов, которые, обладая собственными интересами и предпочтениями, могут сознательно исказить информацию о своих возможностях и предпочтениях. ВХС рассматриваются как двухуровневые активные системы. Центр - метаигрок с правом первого хода управляет ВХС - активной системой назначением стратегий водопользования и тем самым влияет на выбор игроками второго уровня - пользователями - своих состояний. Он проводит встречный способ планирования и реализует механизм открытого управления (честной игры), предполагающий полную информированность игроков о возможных стратегиях и принципах стимулирования принимаемых решений. Центр добивается согласования собственных целей и целей пользователей в стохастических условиях. Инструментом согласования служат цены, назначаемые центром за водопользование и водоотведение. Согласование основывается на справедливой для большинства ВХС гипотезе слабого влияния функций предпочтения отдельных водопользователей на двойственные оценки оптимального плана базовой задачи центра. При распределении выделяемых объёмов водных ресурсов и отводимых масс примесей порознь согласование получается совершенным. При совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов согласование оказывается приближенным, с погрешно-

---

стью, не превосходящей заданную. В этом случае реализуется традиционный маргиналистский подход к оценке изменений результатов производства и назначения цен при отклонениях значений спотовых поставок от величин форвардных контрактов. Он корректен для линейных целевых функций, а также для нелинейных функций, при условии, что отклонения значений поставляемых объёмов водных ресурсов от их гарантируемых величин незначительны.

Предложено назначать цены за недопоставку водных ресурсов и их поставку сверх гарантированных величин в соответствии с ценностью этих ресурсов при производстве продукции. В этом случае согласование интересов Центра и пользователей при раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов совершенное, при совместном управлении - приближённое. Цены, формируемые в обоих случаях согласования, служат ориентирами для регулирующего государственного органа, который должен использовать их как начальные значения для торгов водными ресурсами, результатом которых станут реальные договорные цены. Тем самым симметризуются отношения ВХС и водопользователей.

## Глава 6

# ПОДХОД К СОГЛАСОВАНИЮ СТРАТЕГИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

### 6.1. Введение

Водные ресурсы становятся одним из основных лимитирующих факторов развития человечества. Ускоренная индустриализация, нарастающие урбанизационные процессы, рост населения в развивающихся странах, глобальное потепление и увеличение в связи с этим вероятности засух, плачевное состояние внутренней водной инфраструктуры в большинстве сельскохозяйственных районов мира привели к повышенному спросу на воду и, следовательно, к увеличивающемуся соперничеству за этот ресурс. Соперничество государств, использующих трансграничные водные ресурсы, является источником потенциальных международных конфликтов.

Для ряда стран дефицит пресной воды стал реальным ограничителем экономического роста и является причиной усиления нищеты и социальной напряженности. Проблемы использования трансграничных рек, прежде всего, Иордана, Нила, Тигра, Евфрата, уже оказывались причиной весьма серьезных разногласий между странами. Приведенный список имеет тенденцию к расширению за счет Ганга, Брахмапутры, Лимпопо, Меконга, Сенегала, Замбези, Иртыша, Оби, Куры, Амударьи, Сырдарьи, Аракса. Подобные разногласия активизируются при любом обострении межгосударственных отношений, если имеется хотя бы малейший повод вспомнить о дефиците воды.

Отметим четыре типа географических ситуаций, чреватых конфликтами по поводу водных объектов и ресурсов пресной воды.

Во-первых, граница двух государств может проходить по водоразделу. В этом случае водообеспеченность по двум сторонам водораздела редко бывает одинаковой, что дает повод говорить о «неравномерности» распределения водных ресурсов. Если же на одном склоне имеется дефицит воды, а на другом он отсутствует, то обычно возникает желание исправить природную «несправедливость». Для удовлетворения такого желания известно два способа: захват части водообеспеченной территории посредством применения военной силы и перераспределение стока путем переброски того или иного количества воды через водо-

раздел. Перераспределение стока (даже внутри одного бассейна, как, например, в случае канала им. Москвы) обходится чрезвычайно дорого. Кроме того, в случае трансграничной переброски необходимо строить гидротехнические сооружения на чужой территории, а это не только дополнительные затраты, но и трудные, длительные переговоры ради соглашений, которые априори нередко представляются недостижимыми. Применение военной силы, наоборот, многим государственным деятелям (прежде всего, в развивающихся странах) кажется более доступным по требуемым ресурсам - вопреки урокам истории. Стремление идти таким путем, кроме того, подогревается надеждой заодно решить и какие-либо иные, не только водные проблемы.

Во-вторых, достаточно часто граница двух государств проходит по реке. В этом случае для споров по поводу водопотребления (то есть забора свежей воды из водного объекта) особых причин нет, зато регулярно возникают конфликты из-за водопользования, прежде всего это касается согласования правил судоходства, рыбной ловли, гидротехнического строительства, сброса загрязнений. Резкие обострения конфликтов такого рода случаются нечасто, зато разногласия из-за принадлежности речных островов (разновидность пограничных территориальных споров) нередко приводят к вооруженным столкновениям, но к собственно водным проблемам они имеют лишь опосредованное отношение. Существенно, что отношения между странами, расположенными на разных берегах трансграничного водотока, в принципе как бы симметричны - в том смысле, что воздействия на водный объект, осуществляемые одной страной, как правило, в принципе доступны и другой стране. Конечно, отсюда не следует, что реальные воздействия одинаковы или хотя бы близки; если же водосборные территории по разным берегам реки существенно различны по физико-географическим характеристикам, это и вовсе невозможно.

В-третьих, специфическая ситуация характерна для международных озер. Все причины для разногласий, встречающиеся в случае пограничных рек, имеют место и здесь, однако добавляется и новая причина. Она связана с разведкой и добычей полезных ископаемых, месторождения которых расположены под дном озера. Встает проблема принадлежности таких месторождений, «разделения дна» между государствами, владеющими частями побережья. Некой симметрии, характерной для предыдущего случая, уже нет, хотя бы потому, что межгосударственные границы делят побережье на неравные (и неравноценные) части.

В-четвертых, самая распространенная географическая ситуация, провоцирующая возникновение коллизий по поводу водных ресурсов, - пересечение рекой государственной границы. Страна, расположенная выше по реке («верхняя»), имеет два весьма существенных преимущества в сравнении со страной, на территорию которой водоток приходит, миновав границу («нижней»). Одно из них определяется тем, что загрязнения распространяются вниз по течению, и ущерб от сбросов «верхней» страны терпит не имеющая к ним никакого отношения «нижняя» страна. Первая экономит на природоохранных затратах и получает за счет этого конкурентные преимущества, вторая расплачивается за чужую экономию, поскольку несет дополнительные издержки на подготовку воды для коммуналь-

ного сектора, а также промышленности и сельского хозяйства, недополучает доходы от рыбной ловли и т.п. Другое преимущество «верхнего» государства состоит в том, что, забирая из реки воду, оно уменьшает часть стока, доступную для использования в «нижнем» государстве. В принципе можно и полностью зарегулировать сток, так что на выходе останется только сухое русло (во всяком случае, до того пункта, начиная с которого формируется сток с части водосборной территории, расположенной ниже границы). Ни на загрязнение реки, ни на регулирование стока «нижняя» страна не в состоянии ответить воздействиями на этот водный объект, ее реакция может проявиться только в какой-либо другой сфере.

Разрешение конфликтных ситуаций, связанных с использованием трансграничных водных объектов, происходит в межгосударственных структурах, таких как Дунайская, Рейнская, Индская комиссии. Решения, принимаемые этими структурами, далее называемыми центрами, имеют юридическую силу для их участников - суверенных государств, делегирующих центру такие полномочия. Компромисс, если он удаётся, достигается в результате неформализованного переговорного процесса. Механизмы согласования интересов государств, использующих трансграничные водные объекты, отсутствуют.

Формирование стратегий использования трансграничных водных объектов связано с необходимостью учёта интересов всех государств, использующих их водные ресурсы. Предполагается, что центр обладает информацией, необходимой для принятия компромиссных решений, а государства-водопользователи знают возможные стратегии и умеют организовать и стимулировать выполнение принимаемых решений. Такое открытое управление более чем реально, так как центр - надгосударственный орган - формируется всеми государствами, использующими ресурсы трансграничного водного объекта. В данной работе этот принцип открытого управления применяется в двух возможных ситуациях разработки стратегий использования трансграничных водных ресурсов:

А. Соглашение об использовании трансграничного водного объекта либо отсутствует, либо заключено между частью водопользователей этого объекта;

Б. Такое соглашение существует, но требуется его пересмотр.

Анализ этих ситуаций проводится с использованием математических моделей, основанных на потоковой структуризации водных объектов, описанной в предыдущих главах. Средства получения, перераспределения и использования трансграничных водных ресурсов объединяются в ВХС, в рамках которой происходит согласование интересов государств, использующих трансграничный водный объект. ВХС структурируется в виде сети  $T(J,S)$  с потоками, моделирующими потоки воды в системе. Функция цели трансграничной ВХС складывается из производственных функций государств - ее элементов.

## **6.2. Согласование стратегий при отсутствии соглашений**

Разработка стратегий использования водных ресурсов трансграничных водных объектов основывается на согласовании интересов государств - участников

ВХС, обладающих свободой выбора своего состояния. Для этого при отсутствии соглашения о правилах использования водных ресурсов либо при наличии таких соглашений, заключенных между частью водопользователей (при этом игнорируются интересы некоторых пользователей), ВХС рассматривается как активная двухуровневая система, элементы которой, реализуя собственные предпочтения, могут целенаправленно манипулировать информацией о своих возможностях, целях и эффективности. Методология и математическая модель согласования стратегий использования водных ресурсов пользователями такой системы описаны в главе 5 (разделы 5.3 и 5.6). В этом случае достигается совершенное согласование интересов центра и всех государств, использующих трансграничные водные ресурсы.

### 6.3. Согласование стратегий при пересмотре соглашений

Соглашения об использовании трансграничных водных ресурсов заключаются на определенный срок, в течение которого появляются новые пользователи и закрываются ранее функционировавшие. Развивается производство, меняется технология и отношение общества к использованию водных ресурсов. Возникает проблема пересмотра действующих соглашений, решение которой видится в формировании рынка соглашений на использование водных ресурсов.

Рассматривается рынок водных ресурсов с начальным распределением потоков  $X^0, x^0$  в сети  $T(J, S)$ , соответствующим пересматриваемому соглашению об использовании ресурсов трансграничного водного объекта. Предполагается, что потоки водных ресурсов удовлетворяют условиям:

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega x_s^{\omega 0} - \sum_{s \in S_i^-} x_s^{\omega 0} + b_i^\omega = 0, \quad i \in J, \quad (6.1)$$

$$\underline{x}_s^\omega \leq x_s^{\omega 0} \leq \bar{x}_s^\omega, \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad (6.2)$$

представляющих собой условия (5.2) и (5.9) модели  $D$  главы 5. Аналогичным условиям должны удовлетворять потоки при изменении водохозяйственной ситуации, связанной с заключением сделок купли-продажи разрешений  $\mathcal{Q}_s^\omega$  на исполь-

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega (x_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega) - \sum_{s \in S_i^-} (x_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega) + b_i^\omega = 0, \quad i \in J, \quad \text{где на } \underline{x}_s^\omega = x_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega \text{ (величи-} \quad (6.3)$$

$$\underline{x}_s^\omega \leq x_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega \leq \bar{x}_s^{\omega D}, \quad s \in S. \quad (6.4)$$

Из соотношений (6.3)-(6.4) следуют ограничения на приращения потоков  $\delta_s^\omega$

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega \delta_s^\omega - \sum_{s \in S_i^-} \delta_s^\omega = 0, \quad i \in J, \quad (6.5)$$

Приращения потоков  $\delta_s^\omega$  моделирующих  $\delta_{sl}^\omega$

где  $\delta_s^\omega = x_s^\omega - x_s^{\omega 0}$ ,  $\bar{\delta}_s^\omega = \bar{x}_s^\omega - x_s^{\omega 0}$ .

складываются из приращений части разрешений  $l$ -х пользователей, которые делегируются  $s$ -му пользователю

$$\delta_s^\omega = \sum_{l \in L_s} \delta_{sl}^\omega, \quad L_s = s \in S. \tag{6.7}$$

Заметим, что  $\delta_{sl}^\omega > 0$  означает увеличение потока по 5-й дуге, обусловленное  $\delta_{sl}^\omega > 0$

- уменьшение величины «покупкой» водных ресурсов у  $l$ -го пользователя, а  $\delta_{sl}^\omega < 0$  - уменьшение величины «продажу» водных ресурсов  $s$ -м пользователем  $l$ -му пользователю.

На рынке трансграничных водных ресурсов продаются и покупаются разрешения на их использование  $g_{sl}^\omega$

Ориентиры  $X_s$  в этом процессе не участвуют. Из-за пространственной распределенности и возможных потерь воды в фрагментах  $\beta_{sl}^\omega g_{sl}^\omega$

тах ВХС 5-й пользователь  $g_{sl}^\omega$  может получить только  $\beta_{sl}^\omega$  - коэффициент влияния  $l$ -го пользователя на 5-го. Например, пользователь, расположенный ниже по течению реки, при покупке водных ресурсов у пользователя, расположенного выше, из-за потерь воды «по дороге» может использовать только ту часть покупки, которая дойдет до него. В этом случае хотя бы один из коэффициентов усиления дуг  $\kappa^{\otimes}$ , изображающий участи рек «дороги», отличен от единицы. И наоборот, разрешение на использование водных ресурсов, купленное у пользователя, расположенного ниже по течению, может быть использовано в большем объеме. Коэффициенты  $\beta_{sl}^\omega$

образуют квадратную матрицу взаимного влияния  $\beta^\omega$

При покупке и продаже разрешений на использование водных ресурсов пре-  $x_s^{\omega 0}$  заменяются на  $x_s^{\omega 0}$

образуются возможности пользователей. Значения

$$x_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega = x_s^{\omega 0} + \sum_{l \in L_s} [\beta_{sl}^\omega g_{sl}^{\omega+} + g_{sl}^{\omega-}],$$

где  $g_{sl}^{\omega+} = \max [g_{sl}^\omega, 0]$ ,  $g_{sl}^{\omega-} = \min [g_{sl}^\omega, 0]$ .

Происходит трансформация эффективности их использования. Функции результата использования водных ресурсов государств преобразуются

$$f_s^\omega(X_s, x_s^{\omega 0}, \delta_s^\omega) = f_s^\omega(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^\omega) - \sum_{l \in L_s} [c_{sl}^{\omega+} g_{sl}^{\omega+} - c_{sl}^{\omega-} g_{sl}^{\omega-}], \tag{6.8}$$

где  $c_{sl}^{\omega+}$  - цена, по которой  $l$ -ый пользователь покупает у  $s$ -го пользователя разрешение на использование водных ресурсов,  $c_{sl}^{\omega-}$  - цена, по которой  $l$ -ый пользователь продает свою долю разрешений,  $c_{sl}^{\omega+} > 0, c_{sl}^{\omega-} > 0$ .

При совершении актов купли-продажи разрешений на использование водных ресурсов необходимо соблюдать условия

$$\Delta f_s^\omega(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^\omega) = f_s^\omega(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^\omega) - f_s^\omega(X_s^0, x_s^{\omega 0}) \geq 0, \quad s \in S,$$

пользователь продает свою долю разрешений,

(6.9)

означающие, что ни одному из участников рынка не будет нанесен ущерб. Выполнение условий (6.9), выполнение которых обеспечивает центр, отражает особенность ВХС - пространственно-распределенной природно-технической системы. Наряду с «активными» участниками актов купли-продажи, непосредственно обмениваемыми разрешениями, для которых условия (6.9) выполнены как строгие (иначе, зачем продавать и покупать?), в ВХС присутствуют «пассивные» пользователи, на эффективность функционирования которых влияют сделки, заключаемые «активными» участниками рынка.

Центр заинтересован в рациональном и справедливом распределении водных ресурсов, а также в средствах для обеспечения функционирования ВХС, которые поступают в виде отчислений при совершении актов купли-продажи. Они аккумулируются в фонде стабилизации, предназначенном для компенсации возмож-

$$\varphi(\delta^\omega) = \sum [d_s^{\omega+} \delta_s^{\omega+} - d_s^{\omega-} \delta_s^{\omega-}],$$

где  $d_s^{\omega+}$  и  $d_s^{\omega-}$  - коэффициенты потерь у пассивных участников рынка при совершении актов купли-продажи активными участниками, а также в фонде развития системы, средства которого используются для поддержания ВХС в рабочем состоянии и ее совершенствования. Его интересы заключаются в максимизации функции

(6.10)

где  $\delta_s^{\omega+}$  и  $\delta_s^{\omega-}$  - тарифы отчислений, соответственно, при покупке и при продаже.  $d_s^{\omega+}$  и  $d_s^{\omega-}$  неотрицательны, так как выигрывают продавец и покупатель, они оба пополняют фонды стабилизации и развития.

В согласовании стратегий использования водных ресурсов трансграничного водного объекта участвуют активные и пассивные участники рынка, а также центр. При возникновении хотя бы одной пары активных участников рынка (или нескольких активных пользователей), которые договорились об обмениваемых объемах  $Z^*$  водных ресурсов и их ценах, центр проверяет возможность таких обменов. Для этого решается задача определения потоков  $\xi'''$ , возникающих в результате предполагаемых сделок, которые должны удовлетворять условиям (6.18) и (6.19) допустимости таких распределений водных ресурсов. Если не существуют допустимые  $\xi^\circ$ , соответствующие предполагаемым актам купли-продажи, пользователи, учитывающие возникающие дисбалансы между желаемым и возможным для обмена разрешениями на использование водных ресурсов,



Из соотношений (6.13) и (6.14) следует, что математическое ожидание результата использования водных ресурсов в результате совершенных сделок возрастает, то есть

$$F(X^0, x^1) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} f_s^\omega(X_s^0, x_s^{\omega 1}) > F(X^0, x^0) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} f_s^\omega(X_s^0, x_s^{\omega 0}). \quad (6.15)$$

Переход от потоков  $X^{\omega 0}$  к  $X^{\omega 1}$  злечет пересмотр величин гарантированного водопользования  $X_s$ , оценивающих объемы водных ресурсов, на которые ориентируются водопользователи. Их значения соотнесены конкретным пользователям и не связаны с другими пользователями. Осуществляется переход (при закреплении величин представляющих собой решения задач максимизации математического ожидания результата использования, выделяемых пользователям в результате рыночного обмена водных ресурсов решениями,

$$F_s(X_s, x_s^1) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f_s^\omega(X_s, x_s^{\omega 1}). \quad (6.16)$$

На множествах, выделяемых условиями (5.3) главы 5,

$$\underline{X}_s \leq X_s \leq \overline{X}_s, \quad s \in S. \quad (6.17)$$

Так как в задачах (6.16), (6.17) отыскивается максимум функции  $F_s(X_s, x_s^1)$  на множестве, задаваемом ограничениями (6.17) и содержащем вектор  $X_s^0$ , то

$$F_s(X_s^1, x_s^1) \geq F(X_s^0, x_s^1). \quad (6.18)$$

Неравенства (6.15) и (6.18) совместно означают, что результат использования водных ресурсов трансграничного водного объекта при переходе от начального их распределения  $X^0, x^0$  к распределению  $X^1, x^1$ , полученному в результате описанной процедуры рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов, строго возрастает, т.е.

$$F(X^1, x^1) = \sum_{s \in S} F_s(X_s^1, x_s^1) \geq \sum_{s \in S} F_s(X_s^0, x_s^1) > \sum_{s \in S} F_s(X_s^0, x_s^0) = F(X^0, x^0). \quad (6.19)$$

Замена начального распределения водных ресурсов  $X^0, x^0$  на  $X^1, x^1$  и переход от начальных оценок  $f_s^\omega(X_s^0, x_s^{\omega 0})$  к  $f_s^\omega(X_s^1, x_s^{\omega 1})$

их использования к оценкам

может привести к появлению пользователей, стремящихся продать и купить разрешения на использование водных ресурсов. В этом случае описанная процедура купли-продажи повторяется с  $X^1, x^1$  так же, как она описана выше с  $X^0, x^0$ , и т.д. На каждом шаге этого итерационного процесса оценка использования водных ресурсов повышается. Результат использования водных ресурсов ограничен. Так как возрастающая ограниченная сверху последовательность имеет предел, описанный итерационный процесс рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов сходится.

#### **6.4. Заключение**

Подход к выработке стратегий управления трансграничными водными ресурсами, изложенный в данной главе, приводит к совершенному согласованию стратегий использования водного объекта суверенными пользователями - государствами. Этот же подход применим к согласованию интересов использования ресурсов внутригосударственных водных объектов «самостоятельными» пользователями. В этом случае процесс достижения компромисса упрощается. Центр уже создан, он представлен государственными организациями. Согласование не обременено сложными международными коллизиями.

## Глава 7

# МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ПРИРОДНОЙ РЕНТЫ

В данной работе рассматриваются проблемы управления водными ресурсами, в том числе экономические механизмы согласования стратегий водопользования. Невозможно при этом не затронуть проблемы оценки водной ренты, мягко говоря, недостаточно исследованной. Для этого пришлось обратиться к общим методологическим подходам к формированию и исчислению ренты природных ресурсов. Проблема анализируется, по преимуществу, применительно к водным и минеральным ресурсам. Обращения к земельным, лесным и иным биологическим ресурсам, для которых проблема ренты относительно ясна, имеют целью, главным образом, сопоставление с водными и минеральными ресурсами или противопоставление им.

### **7.1. Введение**

В народном хозяйстве Российской Федерации доминируют ресурсоэксплуатирующие отрасли, сырьевые продукты составляют основную часть экспорта, доходная часть государственного бюджета в решающей мере формируется за счет добывающих производств. Такое положение крайне нежелательно, поскольку экономика с подобной структурой чрезмерно зависит от внешних факторов. Она обречена на технологическое отставание. Присущее ей распределение дохода неизбежно вызывает неудовлетворенность в обществе, грозящую перерасти в социальный протест. В специфических российских обстоятельствах сырьевая ориентация хозяйства грозит стагнацией регионам с относительно развитой инфраструктурой и благоприятными климатическими условиями, где сосредоточена основная часть населения, но отсутствуют эффективные запасы природных ресурсов (подробнее в [Данилов-Данильян, 2001]). Однако в силу инерционности экономических процессов структурные диспропорции сохранятся в предвидимом будущем (10-15 лет) при любых возможных сценариях. Тенденцию усугубления этих диспропорций необходимо переломить и сформировать условия и структуры, которые в дальнейшем обеспечат переориентацию российского народного хозяйства, его поворот к постиндустриальному развитию.

Парадокс состоит в том, что источником средств для реализации мер, которые способны обеспечить поворот от сырьевой специализации к развитию технологичных, информационно-емких отраслей могут быть, прежде всего, сырьевые отрасли. Поэтому проблема оценки и распределения природной ренты стала в последние годы одной из наиболее остро дискутируемой среди всех экономических проблем.

Для сырьевой страны вопросы государственного управления использованием природных ресурсов должны быть приоритетными. Эти вопросы особенно обостряются, если возникает общественное стремление осуществить структурный народнохозяйственный маневр, переход к постиндустриальному развитию. Реализация такой цели неизбежно связана с проблемой природной ренты, хотя ошибочно полагать (а такая точка зрения встречается нередко), что стоит лишь «разобраться» с рентой, и все прочее сразу станет на свои места. При этом «правильное», «справедливое», «оптимальное» распределение природной ренты, даже если предположить, что оно достижимо, не решает всех вопросов управления природопользованием. Здесь возникает задача согласования различных интересов, в том числе разнонаправленных составляющих государственного интереса. Попытки справиться с этой задачей исключительно через перераспределение природной ренты делу помочь не могут.

Ниже предпринята попытка разобраться в проблемах формирования, исчисления и перераспределения природной ренты, структурировать их, определить либо уточнить используемые понятия и на этой основе рассмотреть некоторые из имеющихся предложений по совершенствованию государственного управления использованием природных ресурсов. Рассматриваются только экономические средства управления и некоторые методологические проблемы их законодательного определения. Заметим, что государственное управление природопользованием невозможно без активного использования административных методов, однако здесь на первый план выходит специфика конкретных природных ресурсов, видов сырьевых продуктов, отраслей и предприятий. Юридические вопросы ниже затрагиваются лишь постольку и тогда, поскольку и когда они непосредственно связаны с экономическим аспектом анализа. Проблемы природной ренты исследуются в аспекте взаимоотношений природопользователя с собственником ресурса, для России - с государством.

## **7.2. Природная рента и возможности ее исчисления**

### **7.2.1. Определение**

Под *природной* (природноресурсной) *рентой* понимается часть прибыли, обусловленная использованием природного ресурса в процессе производства. Вместо термина «обусловленная использованием» употребляют термины «возникающая в результате использования», а также «порождаемая использованием» и т.д. [Экономическая энциклопедия, 1999].

Это определение фиксирует источник образования одной из частей прибыли, но оставляет за скобками вопрос о том, как понимать прибыль. Если применительно к конкретному ресурсу, например месторождению, под прибылью понимать реальную прибыль, полученную пользователем ресурса, то ренту придется признать характеристикой не ресурса, а системы «ресурс-пользователь». При этом понимании в случае, когда неумелый предприниматель, применяя для эксплуатации в принципе эффективного ресурса непригодные технологии и привлекая неграмотных инженеров, вовсе не получил прибыли, ренту как часть нуля также следует положить равной нулю. Если ресурс еще не используется, то, соответственно, нет и условий для рассуждений о ренте, возникающей при его использовании.

В этой типичной для экономической науки проблемной ситуации теория предлагает два принципиально различных подхода. Согласно первому (классическому), под прибылью следует понимать *среднюю прибыль*, получаемую при использовании ресурсов данного вида в рассматриваемой экономике. Согласно второму (маржиналистскому) подходу, надо исходить из наилучших возможных условий использования данного ресурса (лучших технологий, лучших трудовых ресурсов, лучшего менеджмента) и принимать в расчет *предельную прибыль*, которая могла бы быть получена в таких условиях. В обоих вариантах понимания прибыли задача ее практической калькуляции отнюдь не тривиальна. Речь ведь идет не об отчетности, а о построении некоего обобщенного экономического показателя, характеризующего производственную отрасль, точнее, совокупность предприятий, использующих данный природный ресурс.

Кроме того, приведенное определение не содержит указаний не только на способ понимания и исчисления прибыли, но и на процедуру вычленения из нее собственно природной ренты, той части прибыли, которая обусловлена использованием природного ресурса (как бы ни понимать прибыль). Приведенное определение не фиксирует также ничего, связанного с собственностью на используемый ресурс. Это правомерно, поскольку отношения собственности весьма существенны при анализе распределения ренты, но не самого ее образования и величины. Структура собственности и другие характеристики социально-экономической системы чрезвычайно важны для эффективности производства, его способности производить прибыль, но теория ренты в любом ее варианте старается отвлечься от этого аспекта, рассматривая природный ресурс в качестве источника ренты применительно к идеализированным условиям.

Калькуляцию прибыли и выделение из нее рентной составляющей можно рассматривать как в значительной степени независимые задачи, но трудности их решения обусловлены общими причинами. В качественном анализе понятия, лишенные количественной определенности, используются подчас весьма продуктивно, однако для операционального применения на практике исчислимость необходима. Может ли она быть обеспечена для природной ренты?

### 7.2.2. Разделение эффекта и разделение затрат

Проблема выделения рентной составляющей из прибыли обусловлена тем, что сам по себе природный ресурс продукта не создает, необходимы также капитал и труд. Возникает классическая задача экономической науки: как разделить эффект, порожденный системой взаимодействующих факторов, между ними? Даже если бы каждый из факторов был способен произвести продукт в каком-то количестве, задача разделения эффекта стала бы тривиальной лишь при том условии, что сумма «индивидуальных» результатов совпадала бы с результатом системы (сепарабельность). Однако в этом случае системы, строго говоря, нет, так как системный эффект отсутствует. Включение дополнительного фактора (или его дополнительного количества) не имеет системного характера. Системный эффект - это превышение результата системы в целом над суммой результатов ее элементов. Выделение элемента из системы разрушает ее. Разделение системного эффекта между обусловившими его факторами - чрезвычайно сложная задача. Ее решение может быть получено только при благоприятном стечении конкретных обстоятельств.

Аналогичная задача возникает, если результат системного многокомпонентного производственного процесса и затраты на его реализацию надо разнести по составляющим результата. Эта задача встречается в анализе производств по переработке комплексного природного сырья (нефть, полиметаллические руды и т.д.). В несколько модифицированном виде возникает она и при определении платежей отдельных пользователей за комплексно эксплуатируемый природный объект. Прежде всего, это относится к водным объектам, которые одновременно используются гидроэнергетикой, речным флотом, рыбным хозяйством и как источник воды для промышленности, сельского и коммунального хозяйства.

Итак, выделяются две концептуально сходные задачи. Первая: оценить вклад одного из факторов либо компонентов системы (в нашем случае - природного ресурса) в общий конечный результат, обусловленный совместным использованием данного фактора вместе с другими. При этом результат имеет единую стоимостную оценку, а факторы затрат измеряются каждый по-своему. Вторая: оценить часть общих затрат, обусловившую один из компонентов конечного результата, в состав которого системно входят и другие компоненты. В случае комплексного производства затраты имеют единую совокупную стоимостную оценку, а составляющие результата измеряются каждый по-своему. В случае комплексного природопользования надо оценить вклад эксплуатируемого природного объекта в результат каждого пользователя, измеряемый независимо от остальных. В теории достаточно ограничиться одной из этих задач. Дальнейшие рассуждения будут излагаться применительно к первой.

Если «прямая» элиминация влияния всех факторов, за исключением исследуемого, невозможна, то следует искать косвенные средства для этого. Они могут быть найдены и оказаться действенными при имеющихся репрезентативных статистических совокупностях объектов, различающихся значениями исследуемого фактора и совокупного результата при «прочих равных условиях». Для современных статистических методов необязательны даже «прочие равные условия», если

информации достаточно для их искусственного «выравнивания». При этом надо определить, о каких условиях (равных или выравниваемых) должна идти речь в связи с рассматриваемой задачей - в данном случае оценивания природной ренты. Если задача, касающаяся природной ренты, ставится на микроуровне, то рентиобразующие природные ресурсы необходимо рассматривать в их многообразии - не только по видам, но и разновидностям, конкретным представителям, иначе задача теряет смысл. (Другая ситуация возникает на макроуровне, когда оценивается роль в экономической динамике природного фактора. В этом случае дифференциация только мешает, от нее следует избавляться с помощью агрегирования.) Кроме того, необходимо принимать во внимание многообразие прочих (неприродных) факторов, то есть все обстоятельства, влияющие на результат производства в системе с природным ресурсом. Они определяются трудовыми ресурсами, основными фондами, инфраструктурой, менеджментом и т.п. Следовательно, вопрос о том, можно ли получить статистически значимые результаты, сводится к сопоставлению количества исследуемых в конкретной задаче объектов (например, участков земли или нефтяных месторождений) и их разнообразия, то есть разброса характеризующих их параметров. Но, конечно, прежде чем оценивать разнообразие объектов, надо выяснить, какие параметры будут для этого измеряться.

### 7.2.3. Специфика рентной проблемы для различных ресурсов

Для различных видов природных ресурсов применительно к исследуемой проблеме ситуации весьма несходны.

Наиболее благоприятно положение с оценкой ренты земельных ресурсов. С них началось изучение проблемы природной ренты в экономической науке. Велико количество земельных участков, для которых ставится вопрос о ренте<sup>1</sup>. Выработана четкая система показателей, характеризующих земельные участки (бонитет почвы, угол и направление уклона, климатические характеристики и пр.) в тех аспектах, которые существенны для рентиобразования. Земельные участки массово продаются на рынке, и рыночная цена коррелирует с рентой. Проблема поиска аналога для участка, имеющего весьма близкие природные характеристики, как правило, разрешима без труда. Немного способов использования земельных участков (сельскохозяйственное, рекреационное, промышленное, для городской и сельской застройки, заповедное), причем участки легко «нарезать» так, что каждому будет соответствовать только один из этих способов. При этом вполне достоверно может быть получена и оценка затрат, необходимых для трансформации участка из одного вида пользования в другой.

Несопоставимо сложнее задача в случае водных и минеральных ресурсов. Верно положение, в соответствии с которым считается, что двух одинаковых месторождений не бывает. Этого достаточно, чтобы усомниться в возможности построения достоверного статистического описания ансамбля месторождений како-

---

<sup>1</sup> Для западноевропейских стран, кроме Финляндии, Норвегии и Швеции, это практически вся их территория, лишь некоторые высокогорные районы Альп и немногие другие составляют исключение.

го-либо природного сырья. Разнообразие объектов, характеризуемое разбросом их параметров, слишком велико в сопоставлении с количеством самих объектов. Существенные трудности возникают уже при попытках сформировать набор параметров, характеризующих месторождение в аспекте рентообразования. Эти параметры должны отражать все свойства месторождения, существенные для получения прибыли при его эксплуатации. К таким свойствам относятся: вид, сорт (марка) и качественные параметры ресурса<sup>2</sup>, объем запасов (вектор тем большей размерности, чем выше разнообразие ресурсов), геометрические параметры (форма и положение рудного тела, угольных пластов, нефтеносных или газоносных структур), твердость и иные механические характеристики, химический состав и прочие свойства вскрышных и вмещающих пород, местоположение (с учетом инфраструктуры, обеспеченности трудовыми и прочими ресурсами, климата) и т.д. и т.п. Число параметров, часть из которых трудно измерима или имеет качественный характер, в данном случае на порядки превосходит то, что имеет место для земельных участков. Однако при этом количество месторождений каждого конкретного полезного ископаемого (за исключением так называемых общераспространенных - песка, гравия, глины) на порядки меньше, чем земельных участков, часто измеряется единицами<sup>3</sup>. При этом для каждого параметра месторождения существуют присущие этому параметру и не воспроизводимые для остальных связи с характеристиками технологий (то есть основных фондов), трудовых ресурсов, менеджмента (иначе не было бы необходимости вводить в рассмотрение все эти параметры). И ни для одного из полезных ископаемых (за исключением упомянутых общераспространенных) не удается построить статистически значимые модели, которые позволили бы элиминировать действие всех факторов, кроме интересующего нас природного (обобщенного, поскольку он должен аккумулировать все параметры месторождения), и оценить его вклад в получение прибыли от эксплуатации месторождения.

В тех случаях, когда имеются теоретические возможности проведения каких-либо расчетов, достоверные результаты можно получить только при достаточно надежных исходных данных. В рассматриваемых задачах это данные о хозяйственной деятельности. В России эта проблема остается нерешенной. Налоговые и иные государственные органы, например, в США не только владеют существенно более обширным и детальным банком данных о субъектах производственной деятельности, чем России, но и погрешность этих данных существенно ниже, чем у нас. Лучше, чем в иных отраслях, дело обстоит в нефтяной и газовой промышленности - исключительно по той причине, что трубопроводы находятся под контролем государства, что позволяет получать более или менее адекватную информацию об экспорте. Однако даже на основе самой лучшей информации можно решить только правильно поставленные проблемы, а сомнения относительно корректности постановки задач применительно к количественной оценке горной рен-

<sup>2</sup> Для характеристики угля, казалось бы, простейшего ископаемого, используется более 30 марок.

<sup>3</sup> Достаточно вспомнить, что, вопреки часто повторяемой мифологии, даже в России содержатся отнюдь не все элементы таблицы Менделеева, не говоря уже о минералах, представленных хотя бы одним пригодным к эксплуатации месторождением.

ты пока остаются. Прежде чем рассматривать альтернативные подходы, кратко остановимся на рентном аспекте деятельности других природоэксплуатирующих отраслей.

Особая острота проблемы природной ренты применительно к добыче минеральных ресурсов объясняется, помимо их исключительно важной роли в современной российской экономике, невосполнимостью этих ресурсов. Прочие природные ресурсы, используемые в народном хозяйстве, обладают свойствами воспроизводимости либо восполнимости, однако при условии, что они охраняются и эксплуатируются надлежащим образом, с соблюдением норм, правил и требований устойчивого природопользования. В настоящее время эти требования в России, как правило, не выполняются, и дело здесь отнюдь не только в рентном аспекте.

В случае водных ресурсов калькуляционный аспект рентной проблематики далеко не проще, чем в случае минеральных. Экономически значимых водных объектов больше, чем экономически значимых месторождений. Достаточно отметить, что участки одной и той же реки, отстоящие один от другого на расстояние, измеряемое подчас всего лишь пятью процентами ее протяженности (а бывает и меньше), в аспекте рентообразования должны рассматриваться как различные водные объекты. Соответственно, исключительно велико и их разнообразие. Здесь сказывается принципиальное осложнение в сравнении с месторождениями полезных ископаемых: с водными объектами связаны активно функционирующие экологические системы. Это обстоятельство очень трудно поддается экономическому учету (и даже осмыслению) и, видимо, является одной из причин того, что проблема ренты за использование водных ресурсов практически не исследована. Проблема выявления и оценки негативных воздействий на водные объекты настолько сложна, что обычно из всех таких воздействий для анализа выбирают лишь простейшее в данном аспекте: сброс загрязненных сточных вод<sup>4</sup>. Тем самым проблема регулирования остальных воздействий подобного рода перекладывается, хотя бы частично, на систему платежей рентного характера (если они предусмотрены).

Месторождения и водные ресурсы не продаются на рынке, а если иной раз и становятся объектом купли-продажи (например на аукционах), то это явление нельзя признать массовым (в отличие от торговли землей). Цена обретает свойства, соответствующие теоретическим постулатам, только при массовых сделках. В единичных сделках цена подвержена сильному и практически не выявляемому влиянию случайных, в том числе уникальных событий и обстоятельств. Она не обладает необходимой усредненностью, устойчивостью и, следовательно, репрезентативностью. Так что рынок - слабый помощник при определении ренты, обусловливаемой эксплуатацией месторождения или водного объекта, хотя вопрос о

---

<sup>4</sup> Из других воздействий, для примера, назовем размывание берегов судовыми волнами, ухудшение условий для нереста при строительстве и функционировании гидротехнических сооружений, движении судов и пр., что приводит к сокращению, если не гибели рыбного стада или вынуждает его к миграции, подтопление территории при подъеме уровня водохранилища или ее обезвоживание при значительном заборе воды.

ее исчислении ставится для экономических условий, определенных рынком. Он может возникать и в централизованно управляемой экономике — в тех ее версиях, которые разрабатывались в ЦЭМИ АН СССР в 1960-х - 70-х годах ([Проблемы..., 1971; Данилов-Данильян, 1980, 1987]). Выводы, представленные ниже, с очевидными поправками справедливы и для этого случая.

Специфичны проблемы определения ренты, обусловливаемой использованием биологических ресурсов. К таким ресурсам относятся: лес, промысловые морские гидробионты, рыбные ресурсы вод суши, объекты охоты, дикоросы (лекарственные растения, ягоды, грибы и пр.). Охота, собирательство и любительское рыболовство регулируются установлением нормативов и квот, призванных обеспечить устойчивое воспроизводство промысловых животных, растений и грибов, продажей лицензий и т.п., рентные проблемы здесь несущественны с практической точки зрения.

Основной вид лесопользования - заготовки древесины. Рентная составляющая в этом производстве значительна по доле в цене и по абсолютному значению. Разнообразие видов (пород) и сортов древесины невелико. Существенно местоположение - отсутствие инфраструктуры стало основным из факторов, сдерживающих рост лесозаготовок (расчетная лесосека в России в целом не вырубается, хотя в приграничных регионах стал систематическим значительный переруб, особенно по ценным породам). Рента за местоположение, не будучи природной рентой в собственном смысле термина, гораздо сложнее поддается оценке, чем рента, обусловленная использованием лесных ресурсов (лесная рента). Если рента за местоположение известна, то для определения лесной ренты не остается принципиальных трудностей: обилие лесозаготавливающих предприятий и их подразделений позволяют получить массив данных, вполне достаточный для достоверного расчета как средней, так и предельной прибыли (по каждой породе и сорту), а затем и выделить из нее рентную составляющую. Однако посылка этого утверждения на практике не выполнена. В Российской Федерации отсутствуют даже попытки оценки ренты за местоположение. Тем не менее, для практических нужд нет особой необходимости разделять лесную ренту и ренту за местоположение, вполне достаточно обходиться представлением о сумме этих рент. Имеется еще одно осложнение: информация о хозяйственной деятельности лесозаготовительных предприятий отличается очень низкой достоверностью, весьма значительное количество древесины обращается в теневой экономике, в том числе ориентированной на экспорт, хотя, казалось бы, не так сложно наладить таможенный контроль вывоза древесины из страны.

Рентная проблематика применительно к добыче морских гидробионтов вполне отчетливо просматривается, когда дело касается лова в экономической зоне России. Если лов производится за ее пределами, то оснований для постановки подобных задач в настоящее время не имеется. Теневые экономические отношения и структуры доминируют и в этой отрасли. Количество видов сырьевой продукции здесь относительно невелико, возможности информационного обеспечения расчетов по природной ренте были бы относительно благоприятны, если бы имелась достоверная информация о хозяйственной деятельности в отрасли. Однако отли-

чия формального отчета от факта, по различным источникам, оцениваются величиной, не меньшей 50 %. Тем не менее с точки зрения экономической теории все отмеченные для биологических ресурсов трудности непринципиальны, они обусловлены не существом проблемы, а спецификой современных российских условий, существенно иных, чем в странах с развитой рыночной экономикой и сложившимся гражданским обществом (хотя, естественно, эта специфика сама по себе является сложнейшей социально-экономической проблемой, только совсем иной, чем рассматриваемая здесь проблема природной ренты).

Приходится констатировать, что наибольшие трудности с оценкой природной ренты возникают в самых существенных случаях - водных и минеральных ресурсов. Эти трудности обусловлены несоответствием объема в принципе возможной информации и потребностей в ней, диктуемой требованием статистической состоятельности результатов. Таким образом, на получение практически пригодных оценок значимости интересующего нас природного фактора статистическими методами рассчитывать не приходится. Для попыток исчисления ренты остаются только теоретические построения маржиналистского типа. Известны два подхода: первый основан на использовании оптимизационных моделей, второй - замыкающих затрат.

#### 7.2.4. Возможности оптимизационного моделирования

Оптимизационные модели при некоторых предпосылках, например линейности или выпуклости входящих в них функций и характеризуемых ими множеств, позволяют вычислить значения переменных не только прямой задачи, но и двойственной. Прямая задача обычно имеет «производственный» характер. Её переменные - показатели хозяйственной деятельности (объемы использования различных производственных процессов, видов деятельности и пр.). Большинство ограничений описывают балансы потребления и наличия ресурсов, целевая функция выражает результат, например, максимизируемую прибыль. Переменные двойственной задачи, обычно именуемые оптимальными или маргинальными оценками, соответствуют ограничениям прямой задачи, в том числе, по факторам производства. Если среди последних в прямой задаче учитываются природные ресурсы, то им соответствуют оптимальные оценки, получаемые из двойственной задачи (при ее разрешимости, которая в случае разрешимости прямой задачи гарантируется). Сблзнительно надеяться, что оптимальные оценки природных ресурсов совпадают со значениями природной ренты или пропорциональны им. Это утверждение или предположение не раз встречалось в литературе по оптимизационному моделированию природопользования [Проблемы..., 1971; Гофман, 1977].

Оптимальные оценки отражают «внутреннюю» значимость ограниченных ресурсов в тех рамках, которые задаются самой моделью. Они не могут быть экстраполированы на ситуации, выходящие за рамки модельных предпосылок. Эти оценки могут быть использованы для принятия решений о расшивке «узких мест» или освобождении от недостаточно эффективных ресурсов. Для этого следует

сравнить оптимальные оценки («внутренние») с внешними, то есть с ценами, по которым такие ресурсы могут быть куплены или проданы на рынке. Если «внутренняя» оценка, отражающая вклад дополнительной единицы оцениваемого ею ресурса в целевую функцию, выше рыночной цены на него, то желательно приобрести дополнительное количество. В противном случае - наоборот, целесообразно реализовать некоторую часть такого ресурса вместо ее использования в данном производстве.

Подобные сопоставления оптимальных оценок с внешними рыночными ценами, весьма обычные при использовании оптимизационных моделей в системах поддержки решений, наталкивают на мысль применить их как аналоги рыночных цен в случаях, когда дело касается неторгуемых ресурсов. Отсюда один шаг до намерения объявить оптимальные оценки природных ресурсов, получаемые из оптимизационных моделей, измерителями природной ренты. Однако следует поставить ряд вопросов, и только в случае положительных ответов на них можно было бы согласиться с подобным намерением [Данилов-Данильян, 1980, 1987; Данилов-Данильян, Рыбкин, 1983].

Во-первых, какие факторы, объекты, процессы и пр. должны быть отражены в оптимизационной модели, чтобы на ее основе можно было получить рентные оценки природных ресурсов, и могут ли быть построены соответствующие модели? Для получения оценок вклада каждого природного ресурса в целевую функцию экономики в целом (только так могут трактоваться рентные оценки в соответствии с определением п. 7.2.1) модель должна отражать все направления и результаты использования природных ресурсов. Такая модель - «сложная, как сама жизнь» - нереализуема. Можно попытаться «обрубить» различные технологические и прочие цепочки, удалить нижние уровни, с тем, чтобы сделать модель обзорной и операциональной. Такие приемы, сводящиеся к агрегированию, срабатывают, если удастся найти подходящие взвешивающие коэффициенты. Однако в данном случае речь идет об агрегировании показателей, связанных с использованием природных ресурсов. Для этого необходимы их оценки - те, которые отыскиваются с помощью модели. Кроме того, в задачах о природной ренте главное - получение именно дезагрегированных рентных оценок в дробной номенклатуре по отдельным ресурсам и объектам. В частности, слова «рентная оценка природных ресурсов для цветной металлургии» не имеют экономического смысла, если рассматриваемая задача касается налогов или фиксированных платежей в бюджет. Итеративные (по рентным оценкам) схемы приводят фактически к первоначальной дезагрегированной модели без надежды ее построить, не то чтобы рассчитать.

Во-вторых, все теоретические рассуждения, дающие повод к попыткам получить оценки природной ренты из оптимизационных моделей, опираются на жесткие предпосылки. Можно ли надеяться на то, что они выполнены - даже если модель будет построена? Эти предпосылки обеспечивают корректность двойственной задачи и существование тех связей между оптимальными решениями прямой и двойственной задач, которые лежат в основе обсуждаемых предложений. Не вдаваясь в детали формулировок таких предпосылок (достаточных условий разрешимости пары двойственных задач и справедливости теорем о свойствах их

решений), отметим, что они заведомо предполагают непрерывность как самих переменных, так и зависимостей, входящих в ограничения и целевую функцию. В случае, когда в модели рассматриваются крупные и/или редкие дискретные объекты (месторождения, водные системы), такая непрерывность не имеет места. Более того, в задаче определения рентных оценок даже не крупные объекты необходимо рассматривать как самостоятельные, не агрегируя их, что лишает всяких надежд на выполнение предпосылок моделирования.

В-третьих, можно пытаться переформулировать задачу с целью её упрощения, снизив требования к информационной полноте результата. А именно, отказавшись от включения в модель описаний природных объектов, свести дело к представлению в ней только ресурсов, фактически даже не ресурсов, а сырьевых продуктов, оставив за пределами модели те виды природопользования, которые принципиально не укладываются в такую схему, например водопользование. Можно ли таким путем построить реалистичную модель с необходимыми свойствами? На этот вопрос ответ также отрицательный. Зависимости объемов производства/потребления сырьевых продуктов от переменных модели окажутся при любых видах сглаживания нелинейными, причем с такими типами нелинейности, которые предопределяют невыполнение упомянутых в предыдущем абзаце предпосылок. Ситуация не изменится и в случае, если попытаться в качестве переменных оставить только объемы производства/потребления сырьевых продуктов - они будут связаны между собой самыми «неудобными» зависимостями [Залеский, 1980а, Б].

Список ухищрений, к которым приводят умозрительные попытки модификации оптимизационных моделей применительно к рассматриваемой проблеме, можно продолжить, обсуждая все более далекие от реальности идеи. Очевидно, в этом нет необходимости: природу задачи (так же как и Природу с большой буквы) не обмануть. Либо из модели будет удален экономический смысл, либо ее не удастся построить и, тем более, провести по ней расчеты.

#### **7.2.5. Замыкающие затраты**

Рассмотрим какой-либо сырьевой продукт (уголь, нефть, природный газ и т.п.). Он производится некоторым множеством предприятий или их подразделений с различными издержками. Максимально высокие издержки (в данной задаче максимум берется с учетом только реально работающих предприятий) - это и есть замыкающие затраты. При затратах на уровне замыкающих, как предполагает маржиналистская концепция, производство еще выгодно предпринимателю, при более высоких - уже нет, окупаемость не обеспечивается. Казалось бы, замыкающие затраты могут служить верным ориентиром для оценки природной ренты [Гофман, 1977; Албегов и др., 1987].

Дальнейшая логика такова. Разница между замыкающими затратами и издержками на некотором конкретном предприятии характеризуют природную ренту, образующуюся на этом предприятии. На замыкающих предприятиях, то есть тех, где индивидуальные затраты равны замыкающим, разница равна нулю. Это

обстоятельство можно интерпретировать как отсутствие на предприятии прибыли сверх маргинально низкого уровня, природная рента включена в состав издержек, а капитал дает минимально приемлемую отдачу. Другая интерпретация объясняет, что в данном случае природной ренты вовсе нет (природный ресурс не обуславливает какой-либо значимой части прибыли). Разница этих интерпретаций (первая признает существование абсолютной водной ренты, вторая обходится без этого понятия) может оказаться существенной только в том случае, когда применение замыкающих затрат корректно, соответствующие построения имеют достаточную методологическую основу и могут быть реально осуществлены.

Но не тут-то было: опять все предпосылки, принимаемые для дефиниции замыкающих затрат, и схемы расчета оказываются не выполненными в действительности [Данилов-Данильян, 1987]. Парадоксально, но замыкающих затрат как бы и нет. Сомнения в том, что это понятие пригодно для практического определения ренты, возникают при построении простейшей картинки. Возьмем отрезок на оси абсцисс для изображения всей области возможных значений издержек, разобьем его на равные интервалы и над каждым интервалом нарисуем столбик, высота которого равна объему производства продукта с издержками из этого интервала. Из теоретических соображений следует, что полученная гистограмма должна представлять собой что-то вроде «частотокола», который сначала монотонно поднимается, потом, возможно, монотонно опускается и обрывается как раз там, где находится точка, соответствующая замыкающим затратам. На деле «частотокол» обрывается и затем возобновляется несколько раз. В нем имеются дыры. Вместо точной и надежно видимой границы, отмечающей замыкающие затраты, получается некая зона неопределенности - *зона замыкания* (термин введен в [Мухин, 1984]), и нет никаких аргументов в пользу выбора какой-либо одной точки из этой зоны. А сама зона при этом совсем не маленькая, и «блуждание» по ней приводит к таким колебаниям оценки природной ренты, которые нельзя признать приемлемыми (в [Мухин, 1984, 1991] описаны убедительные результаты соответствующих исследований по данным угольной промышленности).

Соблазнительно объявить, что все отклонения от теоретической схемы, выявленные в [Мухин, 1984, 1991], объясняются спецификой социалистической системы. Не отражает ли существование зоны замыкания тот тип социальных издержек, который предопределен своего рода «экономическим иждивенчеством» - важным фактором неэффективности такой системы, невозможным в развитой рыночной экономике? Видимо, это верно лишь отчасти, поскольку большинство аномалий определяются другими причинами, а именно, инфраструктурными и географическими факторами. Добыча угля при очень высоких затратах имеет место и оправдана в случаях, когда его доставка потребителю с более эффективных месторождений требует издержек, перекрывающих разницу в производственных затратах. Эти причины при переходе к рыночной экономике не устраняются.

Наконец, для корректности использования замыкающих затрат при исчислении горной ренты необходима множественность предприятий, добывающих конкретный вид минерального сырья. В случае одного или совсем немногих предприятий (случай, типичный для цветной металлургии и добычи некоторых видов хи-

мического сырья) применение замыкающих затрат для решения задач по определению ренты утрачивает экономический смысл.

Таким образом, приходится констатировать, что все рассмотренные подходы к исчислению оценок природной ренты оказываются непригодными на практике применительно к водным и минеральным ресурсам. Более того, из приведенных рассуждений вполне правомерно следует вывод о том, что оценить природную ренту можно только для массово торгуемых на рынке природных ресурсов - на основе информации, доставляемой рыночными ценами. В этом отношении, как и в некоторых других, никакими расчетами и моделями заменить рынок нельзя. Рынок при этом должен, хотя бы в основном, удовлетворять аксиоматике совершенной конкуренции. Извращенные варианты, включающие монополистический рынок, рынок со значительной теневой долей и пр., также не могут служить источником необходимых количественных данных. Однако особенности природных ресурсов таковы, что в случаях, когда имеется практическая потребность в информации о природной ренте, надеяться на формирование природно-ресурсного рынка (за исключением рынка земли и участков для лесозаготовок) не приходится.

### **7.3. Природная рента и налоговая система**

#### **7.3.1. Распределение и перераспределение природной ренты**

Выводы о возможностях исчисления природной ренты не кажутся столь неутешительными, если проанализировать возможности использования таких показателей, если бы они были определены. Многими современными российскими экономистами и политиками движет вполне обоснованная неудовлетворенность тем, как в современной России она распределяется. Государство, согласно законодательству являющееся собственником природных ресурсов, как представляется, получает лишь незначительную часть природной ренты, а основная ее часть остается в распоряжении частных фирм, которым эти ресурсы отданы в эксплуатацию. Более того, законность этой передачи многим кажется весьма сомнительной, что лишь обостряет вопрос о распределении природной ренты<sup>5</sup>. Отсюда возникает требование ее перераспределения, которое в крайнем варианте формулируется следующим образом: «Природная рента должна поступать в доход государства, оставляя добывающим отраслям лишь обычную предпринимательскую прибыль, что было бы и справедливо, и экономически целесообразно» [О стратегии ..., 2002].

---

<sup>5</sup> Передачу природных ресурсов в эксплуатацию частным компаниям часто не отличают от приватизации основных фондов, предназначенных для разработки соответствующих ресурсов. Смешение этих вопросов, принципиально различных, не способствует решению и без того трудных проблем природно-ресурсной ренты.

Смысл предпринимательства - в надежде получить *необычную* прибыль, в поиске лучших, наиболее эффективных условий производства. Поэтому предприниматели необходимы экономике. Совсем другое дело: государство, передавая предпринимателям в пользование принадлежащие ему природные ресурсы, должно установить с ними такие правовые и экономические отношения, при которых ему, государству, будет гарантирована законная доля собственника. Этого не было сделано в ходе российской реформы. Это не то же самое, что «консолидация природной ренты в рамках бюджета». Есть в экономической науке взгляд, согласно которому способности людей, процесс применения которых и есть созидающий или производительный труд, тоже природный, точнее, природно-социальный ресурс. Относительно этого ресурса строится теория, аналогичная теории ренты, возникающей при эксплуатации природных ресурсов (отражение этих взглядов можно найти, например, в [Проблемы..., 1971]). Сторонники этого взгляда не считают, что ренту, производимую в результате использования человеческого труда, следует «консолидировать в рамках бюджета». Но, если быть последовательным, то почему бы не требовать и этого? Не говоря уже о ренте за местоположение и пр. Тогда никому ничего не достанется, кроме зарплаты (и воспоминаний о рыночной экономике), и всякое предпринимательство благополучно умрет.

Экономическая наука со времен Томаса Мальтуса и Давида Риккардо (и даже раньше) небезуспешно занималась рентой, сначала земельной, потом в более общей постановке - природной, а именно, вопросами ее образования, распределения и перераспределения. Как было показано в предыдущем разделе, результаты по методам вычисления величины ренты весьма скромные, и это не следствие какой-либо недоработки, а предопределено сутью явления. Рассчитать величину природной ренты (кроме земельной и лесной) не удастся со сколько-нибудь приемлемой точностью. На самом деле это и не требуется, поскольку намерение полностью отбирать ее у производителей сырьевых продуктов, будучи реализованным, повлечет стагнацию (как минимум - существенное ухудшение экономического состояния) сырьевых отраслей. Без особого труда можно предвидеть последствия, к которым приведет как завышение, так и занижение платы за природные ресурсы, если попытку «консолидировать природную ренту в рамках бюджета» будут осуществлять именно таким способом.

Дело не в том, чтобы изъять полностью природную ренту у природоэксплуатирующих предприятий, а в том, чтобы контролировать процесс ее распределения и перераспределения, при необходимости внося в него коррективы. Этот процесс осуществляется финансовым механизмом в целом и его важнейшей частью - налоговой системой, включая не только налоги в узком смысле термина, но и фиксированные платежи в бюджет. Большинство элементов этой системы и этого механизма в той или иной мере связаны с функцией перераспределения природной ренты. Например, если природная рента не изъята полностью «заранее» (на практике это условие всегда выполнено), то она входит в состав прибыли и частично изымается вместе с налогом на прибыль. Аналогичный вывод справедлив в отношении налога на добавленную стоимость. То же можно сказать о

социальном налоге. Подоходный налог, который платят работники природоэксплуатирующих предприятий, в качестве одной из составляющих также имеет какую-то толику природной ренты. Налоговая база каждого из них включает часть природной ренты. Об экспортных таможенных пошлинах и упоминать нет необходимости - в России это одно из главных средств перераспределения горной ренты.

Природная рента всегда неравномерно распределена между предприятиями, при деятельности которых она образуется, у одних ее больше, у других - меньше, не только в абсолютных, но и относительных показателях. При прочих равных условиях у первых прибыль больше, чем у вторых. Прогрессивный налог на прибыль при надлежащей настройке его параметров, определяющих прогрессивную шкалу, прекрасно учитывает это обстоятельство<sup>6</sup>. Аналогичный вывод справедлив и относительно других упомянутых элементов финансового механизма и налоговой системы.

### 7.3.2. «Рентные платежи» и платежи за использование природных ресурсов в налоговой системе

Перераспределение природной ренты осуществляется в рамках действующей налоговой системы теми ее элементами, которые предназначены не только для этого. Сторонниками «консолидации природной ренты в рамках бюджета» предлагается альтернативный способ - так называемые «рентные платежи». Следует отметить, что «рентные платежи» - название явно некорректное, по крайней мере, по двум причинам: неисчисляемости природной ренты с приемлемой точностью и неизбежности действия других инструментов при ее перераспределении<sup>7</sup>. Платежи за использование природных ресурсов также способствуют перераспределению природной ренты. Помимо того, что они далеко не в полном объеме выполняют эту функцию, она не является единственной для них, более того, и не главной. Главная функция платежей за использование природных ресурсов - стимулировать их эффективное использование и ресурсосбережение. Они являются лучшим инструментом пресечения порчи природных ресурсов<sup>8</sup> и стимулирования их комплексного использования. Они способствуют устойчивой эксплуатации и

<sup>6</sup> Приходится сожалеть, что у нас прогрессивная шкала не применяется. Наше экономическое положение требует ее ввести. Препятствием для этого служит неумение, а возможно, и нежелание собирать прогрессивный налог.

<sup>7</sup> Подчеркнем, что при любом варианте введения в налоговую систему «рентных платежей» другие ее элементы будут продолжать выполнение перераспределительной функции в отношении природной ренты - хотя бы из-за неизбежной неточности исчисления таких платежей, из-за которой после их изъятия часть природной ренты у некоторых предприятий обязательно останется.

Примеры такой порчи: над весьма эффективным пластом угля расположен менее эффективный, и предприятие начинает с разработки нижнего пласта, но это приводит к невозможности в дальнейшем использовать уголь из верхнего пласта; неграмотная эксплуатация нефтяных скважин нередко досрочно заканчивается их обводнением, и значительные извлекаемые в принципе запасы оказывается невозможным добыть и т.п. Еще проще указать такие примеры в водном хозяйстве (истощение поверхностных водных источников при переэксплуатации связанных с ними подземных и т.п.).

обеспечивают их воспроизводство в случае воспроизводимых ресурсов и восполнению разведанных запасов - для невозпроизводимых (стандартное название «воспроизводство минерально-сырьевой базы» терминологически небезупречно).

Параметры финансового механизма и налоговой системы (в нашем случае такие параметры - ставки платежей за использование природных ресурсов) должны рассматриваться как нормативы длительного действия. Их значения могут изменяться, но по возможности редко и не чрезмерно резко. Недопустимо дергать их то вверх, то вниз под воздействием случайных импульсов каждый год. Только стабильность таких нормативов, прозрачность схемы их исчисления, законодательное установление границ их возможных изменений (например повышение не более чем на 10 % в год), заблаговременное объявление об их предстоящих изменениях (не менее чем за год, а возможно, и за два-три года - как бы ни «качалась» конъюнктура) могут обеспечить формирование в стране нормального инвестиционного климата. Относительно быстрые изменения параметров финансового механизма допустимы только тогда, когда они соответствуют интересам бизнеса во всех отраслях (например, «чистое» снижение налогов).

Ставки платежей за использование природных ресурсов и ставки различных налогов, которые, в частности, выполняют функцию перераспределения природно-ресурсной ренты, исчисляются с погрешностями. Их значения не могут быть исчерпывающе обоснованы расчетами по каким-либо экономико-математическим моделям или иными способами. Как и все параметры экономического механизма, они определяются эмпирически, с неизбежными ошибками, с обязательным мониторингом их действия, с необходимой коррекцией по результатам мониторинга. Если так, то, может быть, все приведенные выше рассуждения по поводу исчисления природно-ресурсной ренты бьют мимо цели? Подобно тому, как заведомо «неточно» определяются ставки платежей за использование природных ресурсов и прочие параметры налоговой системы, может быть, следует назначать и «рентные платежи»? Эта аналогия представляется неправомерной по ряду причин.

Во-первых, в рассуждениях о природной ренте обычно предполагается, что ее следует полностью изымать у природопользователя. Как аргументировано выше, эта цель - ложная. В рыночной экономике никто не ставит подобных целей применительно к другим элементам налоговой системы (в отличие от социалистической системы, в которой действовал принцип: свободный остаток прибыли перечисляется в бюджет). Если же не настаивать на этом «полностью», то придется согласиться с тем, что обычная налоговая система, в том числе действующая в России, не только выполняет функцию перераспределения природной ренты, но в широких пределах допускает подстройку, позволяющую эту функцию существенно усилить.

Во-вторых, имеющиеся предложения о способах назначения ставок «рентных платежей» фактически сводятся к введению системы коэффициентов, в совокупности позволяющих учесть качество природного ресурса, и трактуют ренту как величину, зависящую, прежде всего, от этого качества. Чем эта система лучше «обычных» налогов? Точность определения ее параметров несколько не выше,

чем у действующей налоговой системы, но их количество существенно возрастает. Поэтому итоговая ошибка по необходимости будет выше. Получается перенос произвола в другую инстанцию, заведомо менее понятную.

В-третьих, ошибки при определении ставок «рентных платежей» могут оказаться роковыми для предприятий, поставленных из-за этого в особо неблагоприятные условия. Такие же последствия ошибок в параметрах обычной налоговой системы, но они имеют гораздо более широкую область воздействий, поэтому легче выявляются и не требуют для своего исправления индивидуализированного анализа ситуации на конкретных предприятиях.

В-четвертых, многочисленность параметров, которые должны использоваться при назначении ставок «рентных платежей», обуславливает дороговизну этого подхода. Дополнительных затрат требует не только калькуляция ставок, но и мониторинг, неизбежные тяжбы государства и плательщиков (при этом как истцами, так и ответчиками будут выступать и государство, и плательщики). Количество объектов мониторинга и субъектов таких тяжб будет зависеть не только от числа плательщиков, но и от числа параметров, используемых при определении ставки «рентного платежа» для каждого плательщика.

Короче говоря, вместо того, чтобы прояснить ситуацию с распределением и перераспределением природной ренты, попытка прямого введения «рентных платежей» только запутает дело и потребует немалых и притом бесполезных затрат.

### **7.3.3. Взаимодействие налогов и платежей за использование природных ресурсов**

Фиксированный платеж в бюджет (а платеж за использование природных ресурсов относится именно к этой категории) отличается от налога тем, что не зависит от результатов хозяйственной деятельности [Экономическая..., 1999]. Поскольку объем используемых или полученных в распоряжение, а также собственных ресурсов не зависит от результатов текущей деятельности (и, естественно, далеко не полностью определяет их), постольку отношения между государством и природопользователем в данном аспекте оформляются фиксированным платежом.

Можно критиковать приведенное выше по энциклопедии разграничение налога и платежа. К примеру, налог на имущество («лингвистически» именно налог, не говорят «платеж за имущество») тоже не зависит от результатов текущей деятельности. Можно приводить дополнительные условия, которым должен или может удовлетворять платеж в отличие от налога (платеж интернализирует внешний эффект, декларируется его целевое использование, размер платежа в конкретном случае не может быть определен только финансовым/налоговым органом и пр.). По каждому из этих условий возможна целая дискуссия. Все это доказывает, что противопоставление платежа налогу - надуманно и непродуктивно. Фиксированные платежи в бюджет всегда рассматриваются как часть налоговой системы.

Подводя итог, можно повторить: налог отражает экономические результаты деятельности и основан на экономических показателях, определяемых рынком, а

для платежей за минеральные и водные ресурсы надо назначать ставки по всем бесконечно разнообразным месторождениям и водным объектам. Потому, что такая задача может быть решена лишь очень грубо, желаемое перераспределение природо-ресурсной ренты нельзя осуществить введением одних лишь платежей. Налоги на результаты хозяйственной деятельности (в принципе предназначенные для иных целей) для перераспределения природной ренты тоже нужны, они демпфируют ошибки, неизбежные при «назначениях» финансовых показателей, а также выполняют более широкие функции даже в обсуждаемом аспекте.

Платеж за используемые природные ресурсы может быть назначен по-разному, причем различные способы совместимы и могут дополнять друг друга. Как правило, платеж начисляют за изъятое из недр полезное природное вещество (нетто), но иногда принимают во внимание всю извлеченную горную массу (брутто). В ряде стран (например, в Австралии) практикуются платежи не только за используемые, но и за имеющиеся в распоряжении, но не эксплуатируемые ресурсы. Остальные варьируемые детали системы распределения и перераспределения природной ренты, механизма платности за природопользование также встречаются в различных вариантах. В одних странах государство отбирает у горнодобывающих предприятий больше через налоги, чем через платежи, в других - наоборот. Можно усмотреть некие закономерности: на платежи больше приходится там, где лучше отлажена бюджетно-финансовая система, накоплен достаточно богатый опыт платности ресурсопользования и, главное, относительно однородны условия эксплуатации каждого конкретного ресурса (в частности, меньше разнообразие месторождений, соответственно, меньше разброс значений ставок платежей). К России ни одна из этих характеристик не подходит - в отличие, например, от Норвегии, с которой часто, но неправомерно сравнивают нашу страну.

#### 7.3.4. Специфика законотворчества в российских условиях

Анализ экономических механизмов природопользования и возможностей их развития приводит к заключению о том, что привычный для нашей страны подход к проблеме с позиций проектирования, не даст желаемых результатов. Просматривающееся во многих публикациях и законотворческих предложениях желание подготовить проект этих механизмов с тем, чтобы внедрить их «раз и навсегда», представляется глубоко ошибочным. Несоответствие реально достигнутого качества большинства законов, принятых в последние семь-девять лет, тем целям и требованиям, которые декларировались при их разработке, становится все более очевидным. Это объясняется, по крайней мере, тремя причинами. Первая уже указана - неверная ориентация на «идеальный» проект. Вторая - недостаточная квалификация законодательных органов, следствием которой является постоянное внесение ухудшающих искажений в законопроекты при их прохождении через Государственную Думу. Третья - слабость системы исполнительной власти, которой просто не под силу обеспечивать исполнение действующих законов. Часто законы не исполняются не потому, что они - плохие (хотя таких немало), а по-

тому, что исполнительная власть нередко не в состоянии исполнять законы, какими бы они ни были.

Устранить вторую и, особенно, третью из названных причин очень трудно, требуется значительное время (и не только оно). Надо, по крайней мере, осознать их и сообразно этому действовать. Это означает - отказаться от ориентации на «идеальный проект» и переключить усилия на систему исполнения законодательства. Отсюда не следует целесообразность приостановки в законотворческой деятельности. Она должна быть направлена прежде всего на устранение противоречий в действующем законодательстве, чтобы, по возможности, облегчить работу по исполнению законов, снять хотя бы часть бюрократических барьеров и ослабить некоторые из причин их появления. Серьезные законотворческие инициативы стоило бы отложить до тех пор, пока не возникнет уверенность в том, что законотворческий радикализм канул бесследно в Лету и не сменится новыми, еще более радикальными, но по-прежнему невыполнимыми проектами. Что касается настройки параметров применяемых финансовых и налоговых средств, то без метода проб и ошибок здесь не обойтись. Его следует применять сознательно и планомерно, а не сводить к случайной последовательности импульсивных ситуационных реакций.

Подобная установка должна быть принята и в природопользовательском секторе законотворчества. Как отмечалось выше, для постепенного, последовательного движения в таком направлении необходим серьезный мониторинг действия всех элементов финансового механизма и налоговой системы государства. Его цель - выявлять несоответствия в их функционировании тем целям, которые должны преследоваться финансовой и структурной политикой. В последнем случае имеется в виду, прежде всего, ресурсосбережение. Уже эта цель требует, чтобы мониторинг не сводился к сбору данных и их примитивному упорядочиванию. Необходимо как можно более полное, системное представление о каждом элементе и его роли, о перекрестных влияниях элементов. Такое знание, обеспечиваемое комплексным мониторингом и аналитическим аппаратом, должно быть основой разработки изменений в законодательстве. Без подобного знания законодательные изменения производятся вслепую, и вместо того, чтобы упорядочивать и организовывать государственное управление, дезорганизуют его. Немало элементов такого знания уже имеется - из теории, из попыток ее приложений к российским реалиям, из опыта. Не следует только преувеличивать значение этих элементов.

#### **7.4. Заключение**

Понятие природной ренты оказывается весьма специфичным для различных природных ресурсов применительно к проблеме ее исчисления. Имеет место принципиальное несоответствие возможностей информационного обеспечения расчетов природной ренты содержательным требованиям предполагаемого использования результатов таких расчетов. В маржиналистской теории известны два подхода к исчислению природной ренты - с помощью оптимизационных моделей

и на основе оценки замыкающих затрат. Однако в случае горной и водной рент приходится констатировать невыполнение теоретических предпосылок обоих подходов реальным условиям природопользования. Показано, что эти негативные выводы мало значимы для практики, поскольку в финансово-налоговой системе ряд элементов могут успешно участвовать в выполнении функции перераспределения природной ренты. Платежи за использование природных ресурсов - один из таких элементов, их главной функцией является рационализация природопользования. Система платежей за ресурсопользование должна рассматриваться как составная часть финансового механизма и налоговой системы государства и сопрягаться с другими ее частями. Главная цель таких платежей - стимулирование ресурсосбережения, а перераспределение природо-ресурсной ренты - совместная функция различных элементов финансовой системы. Резкие изменения параметров этой системы недопустимы. Серьезные меры по её развитию должны вводиться только законодательством «отложенного действия», то есть принятие закона должно быть отделено от начала его применения периодом, соответствующим глубине производимых перемен.

## Глава 8

# УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДНО-РЕСУРСНЫХ СИСТЕМ

### 8.1. Введение

ВХС представляют собой природно-технические комплексы, подверженные природным и антропогенным воздействиям, влияющим на их функционирование и развитие. Изучение этого влияния предполагает исследование свойств ВХС как динамических управляемых систем. Одним из таких свойств является устойчивость, которая в первом приближении понимается как слабая чувствительность системы к неизбежным возмущениям, при условии, что они остаются в некоторых пределах (их уточнение также является одной из задач, решаемых при создании системы управления).

Понятие устойчивость, происходящее от латинского слова «*stabilis*», имеющего значение «прочно стоящий», широко используется в повседневной жизни. Под этим термином различные авторы понимают различные свойства систем. В работах по рациональному природопользованию устойчивость системы отождествляется с адаптивностью [Молчанов, 1976], стабильностью [Левич, 1976], упругостью [Holling, 1973] и т.п. В последнее время стал часто употребляться термин «устойчивое развитие», появившийся в результате не вполне точного перевода термина «*sustainable development*»; более точный перевод - «непрерывно поддерживаемое развитие». Согласно первоначальному определению [Наше общее будущее, 1989] «устойчивое развитие - это такое развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности». История появления и распространения этого понятия обсуждается в [Данилов-Данильян, Лосев, 2000], связанные с ним методологические проблемы - в [Данилов-Данильян, 2003], его критика - в [Данилов-Данильян, 2007], анализ с позиции устойчивости природных экосистем - [Светлосанов, 2000].

Строгое определение устойчивости как свойства системы в процессе движения при флуктуациях возвращаться сколь угодно близко к исходному режиму дано в 1892 г. А.М. Ляпуновым [Ляпунов, 1950]; в это же время близкое по смыслу понимание устойчивости движения было развито А. Пуанкаре. Эти исследования заложили основы математической теории устойчивости движения. Инструментом

исследования устойчивости ВХС в данной работе является прямой метод Ляпунова, предполагающий построение функций, изучение свойств которых позволяет исследовать устойчивость режимов систем без их вычислений.

Под устойчивостью функционирования и развития ВХС понимается свойство системы возвращаться в исходное множество стратегий развития и режимов функционирования при снятии возмущений в гидрологических, экологических, экономических и социальных условиях. Далее это понятие уточняется при рассмотрении функциональной и структурной устойчивости ВХС.

Под функциональной устойчивостью развития и функционирования ВХС относительно фиксированного набора внешних возмущений в широком смысле понимается свойство множества гарантированных режимов системы, при снятии внешних возмущений, возвращаться к какому-либо режиму из этого множества с сохранением его надежности.

Под функциональной устойчивостью развития и функционирования ВХС в узком смысле понимается свойство не только гарантированных, но и реализуемых режимов системы при снятии внешних возмущений возвращаться в исходное множество с сохранением их надежности. Очевидно, функционирование и развитие ВХС, устойчивое в узком смысле, устойчиво и в широком. Обратное, вообще говоря, не имеет места.

Наряду с функциональной устойчивостью как свойства, характеризующего ВХС с позиций хозяйства, общества и взаимодействия с природой, имеет смысл структурная устойчивость, которая характеризует отклики структуры ВРС и параметров ее элементов на изменяющиеся условия. Под структурной устойчивостью развития ВХС понимается свойство структуры и параметров ее элементов оставаться неизменными при неизбежных внешних возмущениях.

## **8.2. Математическая модель оптимального функционирования ВХС**

Анализ устойчивости основывается на изучении свойств решений, получаемых в математических моделях. Все известные математические модели развития и функционирования ВХС, в том числе и рассматриваемые в данной работе, описываются в виде систем дифференциальных и алгебраических уравнений и неравенств. Это дает возможность использовать разработанный аппарат теории устойчивости динамических систем для исследования влияния возмущений на стратегии развития и режимы функционирования ВХС. Такой подход реализуется далее.

Оптимальное функционирование рассматривается при известных структуре ВХС, параметрах ее элементов и их характеристиках, а также физических условиях, технических, экономических, экологических и социальных требованиях, предъявляемых к системе как составной части хозяйства и элементу окружающей среды. Решение проблемы состоит в выделении оптимальных режимов из множества допустимых. В данной работе анализируется влияние возмущений на устойчивость этих режимов в узком смысле при закрепленных значениях гарантированных показателей количества и качества водных ресурсов, равных их опти-

мальным значениям в невозмущенных условиях. Период функционирования системы предполагается неограниченным,  $t \in [T_0, \infty)$ . Функционирование рассматривается в непрерывном времени.

В модели - основе исследования устойчивости - функционирование ВХС рассматривается в стохастических условиях поступления, перемещения и использования водных ресурсов, которые задаются конечным множеством  $Q$  их возможных реализаций со. Реализуется потоковое описание, представленное в главах 3-5. Количества воды и примесей в элементах ВХС в модели изображаются в виде соответствующих потоков в сети  $Y(J, S)$ . Оптимальное функционирование ВХС описывается задачей определения оптимальных потоков.

Пользователи, участки рек и каналы изображаются дугами с усилением. По-  $x_s^\omega(t)$ , ток в начале дуги

моделирующий интенсивность поступления воды к пользователю (на участок реки или канала), связан с потоком ее в конце  $z^\omega(t)$ , моделирующим интенсивность отведения воды, равенством

$$x_s^{k^\omega}(t) = k_s^\omega(t)x_s^\omega(t - \theta_s^\omega), \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad t \in T, \quad (8.1)$$

с запаздыванием  $\theta_s^\omega$  и  $k_s^\omega(t)$  значения которого не превосходят единицы.

Требования пользователей к количеству водных ресурсов и ограничения на расходы воды на участках рек и каналов в модели порождают ограничения сверху  $\bar{x}_s^\omega(t)$  и снизу  $\underline{x}_s^\omega(t)$

на потоки в дугах

$$\underline{x}_s^\omega(t) \leq x_s^\omega(t) \leq \bar{x}_s^\omega(t), \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad t \in T. \quad (8.2)$$

К ВХС как к элементу окружающей среды, испытывающему антропогенные воздействия и влияющему на характер протекания природных процессов, предъявляются требования в виде ограничений на массы примесей в воде. Эти требова-

ния в модели задаются следующим образом. Вводятся потоки  $y_{sl}^\omega(t), s \in S, l \in L, \omega \in \Omega,$

изображающие примеси, содержащиеся в воде, где  $L$  - конечное множество рассматриваемых видов

жества  $L_v$  по лимитирующему показателю,  $\bigcup_v L_v = L$ . Примеси множества  $L_v,$

$v=1, 2, \dots, N$ , образуют  $v$ -е дозы загрязнений, величины которых не должны превышать единицы. В терминах

$$\sum_{l \in L_v} d_{sl} y_{sl}^\omega(t) \leq x_s^\omega(t), \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad t \in T, \quad \text{потоков в дугах это означает, что} \quad (8.3)$$

где  $d_{sl}$  - величина, обратная предельно допустимой концентрации  $l$ -й примеси в

потоке  $s$ - $v$  дуги. Требования к качеству воды, возвращаемой в ВХС пользователями, задаются такими же условиями

$$\sum_{l \in L_v} d_{sl} z_{sl}^\omega(t) \leq x_s^{k^\omega}(t), \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad t \in T. \quad (8.4)$$

Кроме того, на величины потоков в дугах, изображающих присутствующие в воде примеси, налагаются ограничения

$$y_{sl}^{\omega} \geq \underline{y}_{sl}^{\omega}, \quad z_{sl}^{\omega} \geq \underline{z}_{sl}^{\omega}, \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad t \in T, \quad \text{снизу} \quad (8.5)$$

которые отражают технологические особенности функционирования элементов ВХС и, в частности, максимально возможные степени очистки сточных вод. Условия (8.2)-(8.5) предъявляют более жесткие требования к качеству водных ресурсов, чем непревышение величинами концентраций примесей их предельно допустимых значений порознь. В формировании этих условий учитываются, в основном, особенности функционирования пользователей, требования которых связаны с охраной водной среды и прилегающих территорий.

Сложные процессы переноса и трансформации примесей в модели аппроксимируются линейными процессами и описываются системой линейных дифференциальных уравнений типа уравнений Стритера-Фелпса [Streeter, Phelps, 1925; Вавилин, Циткин, 1977]. Такое описание, отражая основные особенности изменения качества водных ресурсов, допускает анализ и решение задач их рационального использования и управления качеством. Из решений системы линейных дифференциальных уравнений получается зависимость между потоками примесей на

входах и выходах дуг, образующих множество  $S_I \subset S$  и изображающих в сети  $T(J, S)$  пользователей без очистных сооружений, участки рек и каналов

$$z_{sl}^{\omega}(t) = \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma\omega}(t) y_{s\gamma}^{\omega}(t - \theta_s^{\omega}), \quad s \in S_I, \quad (8.6)$$

где  $A_s^{\gamma\omega}(t)$  коэффициенты, характеризующие взаимное влияние примесей и образующие неособенную квадратную матрицу трансформации веществ

Ее размерность совпадает с числом элементов  $L$ . Функциональная связь типа (8.6) между потоками примесей на входах и выходах дуг, образующих множество  $S_n = S \setminus S_I$ , изображающих пользователей с очистными сооружениями, отсутствует, так как в зависимости от режимов функционирования

могут быть очистных сооружений при  $y_{sl}^{\omega}(t)$  и  $z_{sl}^{\omega}(t)$  одних и тех же значениях потоков

Поток на входах и выходах дуг множества  $S_n$  взаимосвязаны затратами на очистку воды от примесей.

Источники воды с неуправляемыми расходами (например, речной сток) в модели изображаются источниками потоков заданной интенсивности

располагающимися в вершинах  $i \in J$ . Источники воды с управляемыми расходами (например, переброска вод из других регионов) в модели изображаются в виде фрагментов  $T(J, S)$ , содержащих дополнительно вводимые вершины, из которых исходят по две дуги  $s_1$  и  $s_2$  с ко-

эффициентами  $k_{s_1}^{\omega}(t) = 1$  и  $k_{s_2}^{\omega}(t) = 0$   $x_{s_1}^{\omega}(t)$  и  $y_{s_2l}^{\omega}(t)$ ,  $l \in L$  дуги

Потоки  $s_1$  моделируют интенсивность поступления воды и примесей из источника в систему, потоки  $x_{s_2}^{\omega}(t)$  и  $y_{s_2l}^{\omega}(t)$ : дуги  $s_2$  - неиспользуемую в системе часть интен-

сивности источника. Во введенных вершинах располагаются источники потока с заданными интенсивностями  $b_{i0l}^\omega, b_{il}^\omega, l \in L$ , соответствующими наибольшим значениям количества воды и примесей, которые могут быть получены от источника

в единицу времени. Диапазоны возможных значений  $x_{s1}^\omega(t)$  и  $x_{s2}^\omega(t)$  задаются условиями типа (8.2), диапазоны значений  $y_{s1l}^\omega(t)$  и  $y_{s2l}^\omega(t)$  - типа (8.3). Затраты на функционирование таких источников относятся к дугам  $s_1$ , функции затрат дуг  $s_2$  полагаются тождественно равными нулю.

Водохранилища рассматриваются как единое целое с

расположенными на них  $i \in J$ , запасы которых водопользователями и изображаются складами в вершинах  $u_{il}^\omega(t), l \in L$ , соответствующих объемам воды в водохранилищах, запасы  $x_i^\omega(t)$  - мас-

сам примесей. Требования пользователей и особенности водоемов порождают множества возможных значений запасов

$$\underline{x}_i^\omega(t) \leq x_i^\omega(t) \leq \bar{x}_i^\omega(t); \quad (8.7)$$

$$\sum_{l \in L} d_{il} y_{il}^\omega(t) \leq x_i^\omega(t); \quad \underline{y}_{il}^\omega(t) \leq y_{il}^\omega(t); \quad i \in J, t \in T, \omega \in \Omega, l \in L, \quad (8.8)$$

аналогичные условиям (8.2)-(8.5), которым должны удовлетворять потоки, имитирующие расходы водных ресурсов и их качество у пользователей, на участках рек и каналах.

Зависимости потерь воды из водохранилищ на фильтрацию, испарение и льдообразование аппроксимируются линейными функциями потерь из складов сети  $\Pi S$

$$\delta x_i^\omega(t) = \gamma_i^\omega(t) x_i^\omega(t) \quad (8.9)$$

с коэффициентами потерь  $\gamma_i^\omega(t)$  принимающих значения от нуля до единицы.

Запасы примесей на складах сети  $F(J, S)$ , так же, как и потоки, соответствующие расходам примесей у пользователей, в участках рек и каналах, удовлетворяют системе уравнений типа Стриттера-Фелпса

$$\dot{y}_{il}^\omega(t) = \delta_{il}^\omega(t) = \sum_{\gamma \in L} A_i^{\gamma\omega}(t) y_{i\gamma}^\omega(t) + e_{il}^\omega(t), \quad (8.10)$$

$A_i^{\gamma\omega}(t)$  где точка над функцией  $A_s^{\gamma\omega}(t)$  в (6),  $e_{il}^\omega(t)$  означает ее дифференцирование по времени,

коэффициенты аналогичны коэффициентам  $\gamma_{il}^\omega(t)$  - поток  $l$ -й примеси, поступающей или выходящий из  $i$ -го склада.

Законы сохранения масс воды и примесей в модели представлены в виде системы уравнений

$$\sum_{i_\alpha \in a_i} \dot{x}_i^\omega(t) = \delta_{i0}^\omega(t) = \sum_{s_\alpha \in S_i^+} x_{s_\alpha}^{\omega\omega}(t) - \sum_{s_\alpha \in S_i^-} x_{s_\alpha}^\omega(t) + \sum_{i_\alpha \in a_i} \delta x_i^\omega(t) + b_{i0}^\omega(t), \quad (8.11)$$

неразрывности потоков в вершинах сети

$$e_{il}^\omega(t) = \sum_{s \in S_i^+} z_{sl}^\omega(t) - \sum_{s \in S_i^-} y_{sl}^\omega(t) + b_{il}^\omega(t), \quad l \in L, \quad (8.12)$$

где  $b_{il}^\omega(t)$  - поток  $l$ -я примеси, поступающей в  $i$ -ю вершину.

Так как вместе с водой к пользователям, на участки рек и каналов поступают примеси, причем их концентрации совпадают с концентрациями примесей в створах ВХС, то в вершинах сети  $T(J, S)$  должны быть выполнены условия

$$y_{sl}^\omega(t)x_{\tilde{s}}^\omega(t) = y_{\tilde{s}l}^\omega(t)x_s^\omega(t), \quad s, \tilde{s} \in S_i^-, \tag{8.13}$$

означающие требование совпадения соотношений между разнородными потоками на входах дуг, исходящих из одной вершины.

Модель описывает функционирование ВХС с запаздывающими расходами водных ресурсов и содержащимися в них примесями. Поэтому потоки в дугах - аналоги расходов - должны удовлетворять начальным условиям на полуинтервалах первоначального запаздывания, а объемы воды и массы примесей в начале расчетного периода в водохранилищах задаются в виде запасов в складах сети

$$\begin{aligned} x_i^\omega(t) &= x_i^0(t) \text{ и } y_{sl}^\omega(t) = y_{sl}^0(t) \text{ для } t \in [T_0 - \theta_\alpha^\omega, T_0), s \in S, l \in L; \\ x_i^\omega(T_0) &= x_i^0(T_0), \quad y_{il}^\omega(T_0) = y_{il}^0(T_0), \quad l \in L, i \in J. \end{aligned} \tag{8.14}$$

В рассматриваемой постановке экономический результат функционирования элементов ВРС оценивается производственными функциями которых затраты на получение, доставку и очистку водных ресурсов вычитаются

$$\tilde{f}_r^\omega(x_r^\omega(t), y_r^\omega(t)), \quad r \in R = S \cup J, \quad \text{векторы потоков } x_r^\omega(t)$$

$$y_r^\omega(t) = \{y_{rl}^\omega(t), z_{rl}^\omega(t) | l \in L\}, \quad r \in S, \text{ и } y_r^\omega(t) = \{y_{rl}^\omega(t) | l \in L\}, \quad r \in J.$$

из эффекта от их использования. Здесь

Они выпуклы по каждому из переменных  $x_r^\omega(t), y_{rl}^\omega(t), z_{rl}^\omega(t)$  в силу закона убывающей эффективности [Самуэльсон, 1964]: с увеличением количества воды у пользователя падает отдача от использования единицы ее объема и с увеличением степени очистки растут удельные затраты на очистку сточных вод от загрязняющих веществ.

Так как степени очистки водных ресурсов от различных примесей функционально взаимосвязаны, то чистятся комплексы примесей

$$Y_r^\omega(t) = \sum \sigma_{rl} y_{rl}^\omega(t), \tag{8.15}$$

где  $\sigma_{rl}(t)$

$\tilde{f}_r^\omega(x_r^\omega(t), y_r^\omega(t)) = \tilde{\varphi}(x_r^\omega(t), Y_r^\omega(t))$  выпуклы также по переменным  $Y_r^\omega(t)$ . описывающим комплексы примесей.

коэффициенты значимости  $l$ -х примесей в комплексе. Функции  $\tilde{f}_r^\omega(x_r^\omega(t), y_r^\omega(t))$  и  $\tilde{\varphi}(x_r^\omega(t), Y_r^\omega(t))$ , и

вающим комплексы примесей. Однако по совокупности всех переменных функции вообще

$y_{rl}^\omega(t), z_{rl}^\omega(t)$  и  $x_r^\omega(t), Y_r^\omega(t)$  говоря, невыпуклые, а данной работе эти функции предполагаются дифференцируемыми. При этом общность рассмотрения проблемы не нарушается, так как функции, выпуклые по каждой координате, непрерывны во внутренних точках области определения и могут быть аппроксимированы дифференцируемыми функциями с погрешностью, не превосходящей заданную.

Эффективность функционирования элементов ВРС во времени оценивается функционалами

$$F_r^\omega(x_r^\omega, y_r^\omega) = \int_{T_0}^{\infty} f_r^\omega(x_r^\omega(t), y_r^\omega(t), t) dt = \int_{T_0}^{\infty} \eta(t) \tilde{f}_r^\omega(x_r^\omega(t), y_r^\omega(t)) dt, \quad (8.16)$$

дисконтированных во времени, описанных выше функций

$F_r^\omega(x_r^\omega, y_r^\omega)$  оценка результатов

В функционалах

функционирования элементов ВХС в различные моменты времени приводятся к одному моменту времени при помощи дисконтирующего множителя

$$\eta(\rho(t), t)$$

положительной убывающей функцией времени [Лившиц, 1971], зависящей от нормы дисконта  $\rho$  и  $t$ . Стандартный вид

$$\eta(\rho(t), t) = (1 + \rho)^{-t}$$

со значением нормы дисконта, находящегося в пределах

$$1 > \rho > 0$$

Интеграл этой функции

$$H = \int_{T_0}^{\infty} \eta(\rho(t), t) dt \quad (8.17)$$

ограничен. В частности,  $\int_0^{\infty} (1 + \rho)^{-t} dt = \frac{1}{\ln(1 + \rho)}$ .

Режиму оптимально функционирующей ВХС при совместном учете использования водных ресурсов и управления их качеством в модели соответствует оптимальный вектор потоков в дугах и запасов в складах  $x^0(t), y^0(t) = \{x_r^{0\omega}(t), y_r^{0\omega}(t) | r \in R, \omega \in \Omega\}$ , моделирующий перемещение воды и содержащихся в ней примесей. Вектор  $x^0(t), y^0(t)$  является решением задачи, далее обозначаемой  $A$ .

**Задача А.** Найти вектор потоков в дугах и запасов в складах  $x^0(t), y^0(t)$  сети  $T(J, S)$ , на котором достигается минимум функционала, описывающего математическое ожидание результативности функционирования ВХС, складывающейся из оценок эффективности функционирования отдельных элементов

$$F(x, y) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega F^\omega(x^\omega, y^\omega) = \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{r \in R=J \cup S} p^\omega F_r^\omega(x_r^\omega, y_r^\omega) \quad (8.18)$$

на множестве  $G_A$  выделяемом правилами (8.1), (8.6), (8.9), (8.10) преобразования потоков в дугах и запасов в складах, моделирующими перемещение и трансформацию водных ресурсов и содержащихся в них примесей; уравнениями (8.11), (8.12), представляющими в модели законы сохранения масс воды и примесей; соотношениями (8.13), описывающими взаимосвязи потоков воды и примесей; ограничениями (8.2)-(8.5), (8.7), (8.8), накладываемыми на величины потоков в дугах и запасы в складах сети  $T(J, S)$ , моделирующие массы воды и  $x^0(t), y^0(t)$  примесей в элементах ВХС.

Вектор решение задачи  $A$  соответствует невозмущенному режиму оптимально функционирующей ВХС, устойчивость которого исследуется в данной работе. Рассматривается влияние возмущений на режимы, отождествляе-

мые с векторами  $x^\circ(t), y^\circ(t)$  в двух вариантах управления ВРС, представляющих собой использование водных ресурсов без учета их качества и управление качеством водных ресурсов при заданных расходах и объемах.

### 8.3. Критерий устойчивости функционирования

Функционирование ВХС, описываемое системой уравнений и неравенств (8.1)—(8.14), которыми выделяется допустимое множество  $G_A$  задачи оптимального функционирования  $A$ , устойчиво в узком смысле в сфере  $\left\{ \left\| x^\circ(t), y^\circ(t) - x^\circ(t), y^\circ(t) \right\| \leq \alpha \right\}$ , где  $x^\circ(t), y^\circ(t)$  — множество

невозмущенный режим), если для  $\epsilon \leq E$  можно найти такое положительное число

любого  $\delta$ , положительного числа

начинающаяся в сферической области  $S(\delta)$  в момент времени  $t_0 \geq T_0$ , во все последующие моменты времени остается в сферической области  $S(\epsilon)$ .

что траектория вектора  $x(t), y(t)$ ,

Изучение устойчивости режимов функционирования ВХС сводится к изучению устойчивости движений

удовлетворяющих системе дифференциальных уравнений (8.10) и (8.11) в области  $G_A$ . Вектор  $x^\circ(t), y^\circ(t)$  принадлежит множеству оптимальных векторов - решений задачи.  $A: M = \text{Arg} \min_{x, y \in G_A} F(x, y)$ .

Структура задачи  $A$  такова, что она распадается на независимые задачи  $A^\omega$  каждая из которых соответствует одной реализации стохастических условий  $\omega \in \Omega$ .

Найти вектор потоков в дугах и запасов  $x^{\omega 0}(t), y^{\omega 0}(t) = \{x_r^{\omega 0}(t), y_r^{\omega 0}(t) | r \in R\}$ , на котором достигается минимум функции затрат  $F^\omega(x^\omega, y^\omega)$  при реализации  $co$  стохастических условий на множестве в складах сети  $T(J, S)$

можных реализаций стохастических условий  $\Omega$ .

Задача

выделяем условиями (8.1)—(8.13) для одной реализации  $co$  из множества воз- Устойчивость движений  $x^\circ(t), y^\circ(t)$  из множества оптимальных векторов  $M$   $x^{\omega 0}(t), y^{\omega 0}(t)$

задачи  $A$  в области  $G_A$  будет следовать из устойчивости движений

$$A^\omega M^\omega = \text{Arg} \min_{x^\omega, y^\omega \in G_A^\omega} F^\omega(x^\omega, y^\omega);$$

из оптимальных множеств задач

описываемых

Критерием устойчивости движений  $x^{\omega 0}(t), y^{\omega 0}(t)$  из множества  $M^\omega$  в области  $G_A^\omega$  является существование функции Ляпунова  $V^\omega(q_i^\omega(t), u_i^\omega(t), t)$  переменных системами дифференциальных уравнений (8.10), (8.11).

$q_j^\omega(t) = x_j^\omega(t) - x_j^{\omega 0}(t) = \{q_i^\omega(t) = x_i^\omega(t) - x_i^{\omega 0}(t) | i \in J\}$  и  $u_j^\omega(t) = y_j^\omega(t) - y_j^{\omega 0}(t) = \{u_{il}^\omega(t) = y_{il}^\omega(t) - y_{il}^{\omega 0}(t) | i \in J, l \in L\}$  [Колмановский, Носов, 1981; Четаев, 1965].

Функция  $V^\omega(q_j^\omega(t), u_j^\omega(t), t)$  строится положительно определённой на множестве допустимых возмущений  $\Delta\pi_A^\omega$ , выделяемом системами

полученными из соотношений (8.2) -  $\in R = S \cup J$ .

$$-y_{rl}^{\omega 0}(t), u_{sl}^{k\omega} = z_{sl}^{\omega 0}(t) - z_{sl}^{\omega 0}(t). \text{ Наряду с линейными ограничениями } (y_{rl}^\omega(t) - y_{rl}^{\omega 0}(t) + u_{rl}^\omega(t) \geq \underline{y}_{rl}^\omega(t), z_{sl}^{\omega 0}(t) + u_{sl}^{k\omega}(\Delta\pi_A^\omega) = y_{sl}^\omega(t) -$$

$$\left. \begin{aligned} & y_{rl}^{\omega 0}(t) + u_{rl}^\omega(t) \geq \underline{y}_{rl}^\omega(t), z_{sl}^{\omega 0}(t) + u_{sl}^{k\omega}(\Delta\pi_A^\omega) = y_{sl}^\omega(t) \\ & 2 \left[ \sum_{l \in L_v} d_{rl} q_{rl}^{\omega 0}(t) - x_r^{\omega 0}(t) \right] + \sum_{l \in L_v} d_{rl} u_{rl}^\omega(t) \leq y_r^\omega(t), \\ & 2 \left[ \sum_{l \in L_v} d_{sl} u_{sl}^{\omega 0}(t) - x_s^{k\omega 0}(t) \right] + \sum_{l \in L_v} d_{sl} u_{sl}^{k\omega}(t) \leq y_s^{k\omega}(t), \quad r \in R, s \in S, l \in L, i \in J, \\ & u_{sl}^{k\omega}(t) = \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma\omega}(t - \theta_s^\omega) u_{s\gamma}^\omega(t) \end{aligned} \right\} \text{участвуют нелинейные равенства} \quad (8.19)$$

$$q_i^\omega(T_0) = x_i^\omega(T_0) - x_i^{\omega 0}(T_0) = 0, i \in J,$$

$$u_{il}^\omega(T_0) = x_{il}^\omega(T_0) - x_{il}^{\omega 0}(T_0) = 0, i \in J,$$

$$q_s^\omega(t) = x_s^\omega(t) - x_s^{\omega 0}(t) = 0 \quad \text{для } t \in [T_0 - \theta_s^\omega, T_0], \quad s \in S,$$

$$u_{sl}^\omega(t) = y_{sl}^\omega(t) - y_{sl}^{\omega 0}(t) = 0 \quad \text{для } t \in [T_0 - \theta_s^\omega, T_0], \quad s \in S,$$

приращений возмущенных режимов  
мирования допустимого множества

$$q_{sl}^{\omega 0}(t) q_s^\omega(t) + x_s^{\omega 0}(t) u_{sl}^\omega(t) + u_{sl}^\omega(t) y_s^\omega(t) = \quad (8.20)$$

полученные подстановкой приращений возмущенных режимов в соотношения (8.13).

Для устойчивости движений  $x^{\omega 0}(t), y^{\omega 0}(t)$  из множества режимов  $M^\omega$  полна\* производная функции Ляпунова по времени

$$+ \sum_{i \in J} \sum_{l \in L} \frac{\partial V^\omega(q_j^\omega(t), u_j^\omega(t), t)}{\partial u_{il}^\omega} \frac{dz_{il}^\omega(t), u_j^\omega(t), t}{dt} + \sum_{i \in J} \frac{\partial V^\omega(q_j^\omega(t), u_j^\omega(t))}{\partial q_i^\omega} \frac{dq_j^\omega(t)}{dt} +$$

должна быть отрицательно определена в силу систем дифференциальных уравнении возмущенного движения

$$\dot{q}_i^\omega(t) = \delta_i^\omega(t) = \sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega(t) q_s^\omega(t - \theta_s^\omega) - \sum_{s \in S_i^+} q_s^\omega(t) - \gamma_i^\omega(t) q_i^\omega(t), \quad i \in J,$$

$$\dot{u}_{il}^\omega(t) = \delta_{il}^\omega(t) = \sum_{\gamma \in L} A_i^{\gamma\omega}(t) u_{i\gamma}^\omega(t) + \sum_{s \in S_i^+} u_{sl}^{k\omega}(t) - \sum_{s \in S_i^-} u_{sl}^\omega(t),$$

(8.21)

(8.22)

которые получены из уравнений (8.9)—(8.12) при подстановке в них значений переменных

$$A^\omega.$$

возмущенной и невозмущенной задач

Для устойчивости движений множества решений  $M^\omega$  задач  $A^\omega$ , описывающих оптимальное функционирование ВХС - неавтономных динамических систем (ограничения, выделяющие допустимые возмущения, и дифференциальные уравнения возмущенного движения (8.19)—(8.22) зависят явно от времени  $t$ ), необходимо также существование положительно определенной функции

не зависящей явно от времени  $t$ , такой, что

$$W^\omega(q_J^\omega(t), u_J^\omega(t)),$$

$$W^\omega(q_J^\omega(t), u_J^\omega(t)) \leq V^\omega(q_J^\omega(t), u_J^\omega(t), t)$$

для всех векторов  $q_J^\omega(t), u_J^\omega(t)$  из множества  $\Delta\pi_A^\omega$  допустимых возмущений и всех значений  $t$ ,  $t_0 \in [T_0, \infty)$ , больших

$$V^\omega(q_J^\omega(t), u_J^\omega(t), t)$$

Если функция некоторого

допускает бесконечно малый высший пре-

$\sigma$  найдется такое отличное от нуля

$$t \geq t_0,$$

дел, т.е. для любого положительного числа

число  $\delta$ , что при всех

$$[T_0, \infty): \quad V^\omega(q_J^\omega(t), u_J^\omega(t), t) > 0 \quad |q_J^\omega(t), u_J^\omega(t)| < \delta$$

где  $t_0$  - некоторое значение переменной  $t$  из

тервала, в области полуин- будет выпол-

и

няться неравенство  $V^\omega(q_J^\omega(t), u_J^\omega(t), t) < \sigma$  то невозмущенный режим асимптотически устойчив.

Если для сколь угодно малых значений возмущений режима функционирования ВРС, для которых функция Ляпунова  $V^\omega(q_J^\omega(t), u_J^\omega(t), t)$  положительна, ее

полная производная по времени  $\frac{dV^\omega(q_J^\omega(t), u_J^\omega(t), t)}{dt}$  может принимать значения

одного знака с  $V^\omega(q_J^\omega(t), u_J^\omega(t), t)$ : то невозмущенный режим неустойчив.

#### 8.4. Устойчивость оптимального использования водных ресурсов

Использование водных ресурсов без учета их качества при реализации стока частным случаем задачи, в котором отсутствуют потоки, имитирующие примеси,  $B^\omega$  присутствующие в воде.  $A^\omega$ ,  $B^\omega$  состоит в определении вектора  $x^{\omega 0}(t)$ , соответствующего опти-

*Задача*

ВХС. Множество допустимых векторов задачи  $G_B^\omega$  выделяется линейными ограничениями (8.1), (8.2), (8.9), (8.11),

(8.14) и (8.15). В задаче  $B^\omega$  минимизируется случай функционала (8.18)

$$F^\omega(x^\omega) = \sum_{r \in R=J \cup S} F_r^\omega(x_r^\omega) = \sum_{r \in R} \int_{T_0}^{\infty} f_r^\omega(x_r^\omega(t), t) dt = \sum_{r \in R} \int_{T_0}^{\infty} \eta(t) \tilde{f}_r^\omega(x_r^\omega(t)) dt. \quad (8.24)$$

Вектор

$B^\omega$

решение выпуклой задачи оптимального управления

$\underline{\lambda}^{\omega 0}(t), \bar{\lambda}^{\omega 0}(t), \alpha^{\omega 0}(t)$ , где  $\underline{\lambda}^{\omega 0}(t) = \{\underline{\lambda}_r^{\omega 0}(t) | r \in R\}$ ,  $\bar{\lambda}^{\omega 0}(t) = \{\bar{\lambda}_r^{\omega 0}(t) | r \in R\}$  и  $\alpha^{\omega 0}(t) = \{\alpha_i^{\omega 0}(t) | i \in J\}$  взаимосвязан с вектором  $\underline{\lambda}_r^{\omega 0}(t)$  и  $\bar{\lambda}_r^{\omega 0}(t)$  оптимальных

двойственных

переменных

неотрица- [Хранович, 2001]. Переменные

тельны. Их значения оценивают влияние требований, предъявляемых элементами ВХС к объемам и расходам поступающей к ним воды, и показывают величину, на

$\bar{x}_r^\omega(t)$

или увеличении

$\underline{x}_r^\omega(t)$  на единицу. Оптимальные экономические оценки  $\underline{\lambda}_r^{\omega 0}(t)$  и  $\bar{\lambda}_r^{\omega 0}(t)$  ограни- которую увеличатся затраты в системе при уменьшении

$\underline{x}_r^\omega(t)$  и  $\bar{x}_r^\omega(t)$  могут

принадлежат границам мно-

в

$x_r^{\omega 0}(t)$

жеств  $\pi_{rq}^\omega$ ,

$x_r^{\omega 0}(t)$  однове-

$\bar{\lambda}_r^{\omega 0}(t)$

$\underline{x}_r^\omega(t)$  и  $\bar{x}_r^\omega(t)$  то и величины  $\underline{\lambda}_r^{\omega 0}(t)$  и

чений

$\alpha_i^{\omega 0}(t)$  выделяемым условиями (8.2) и (8.7). Так как потоки

менно не могут принимать значения

одновременно положительными быть не могут.

Переменные потенциалы вершин - имеют смысл дифференциаль- ных экономических оценок водных ресурсов. Они показывают, как изменятся ре- зультаты использования водных ресурсов в оптимально функционирующей ВХС при изменении удельных объемов водных ресурсов в водохранилищах

$$\alpha_i^{\omega 0}(t) = \frac{\partial F^\omega(x^{\omega 0}(t))}{\partial x_i^\omega(t)} = \frac{\partial F_i^\omega(x_i^{\omega 0}(t))}{\partial x_i^\omega(t)}. \quad (8.25)$$

$$\alpha_i^{\omega 0}(t) = \int_t^{\infty} \left[ \frac{\partial}{\partial x_i^\omega(\tau)} f_i^\omega(x_i^{\omega 0}(\tau), \tau) - \gamma_i^\omega(\tau) \alpha_i^{\omega 0}(\tau) \right] d\tau - \int_t^{\infty} d\underline{\lambda}_i^{\omega 0}(\tau) + \int_t^{\infty} d\bar{\lambda}_i^{\omega 0}(\tau), \quad i \in J. \quad (8.26)$$

Возмущения  $q^\omega(t) = x^\omega(t) - x^{\omega 0}(t)$

режима функционирования ВХС, описы-

ваемого оптимальным вектором  $x^{\omega 0}(t)$   $B^\omega$ , принадлежат допустимому задаче

множеству  $\Delta \pi_B^\omega$ , выделяемому ограничениями (8.19), и удовлетворяют системе

дифференциальных уравнений возмущенного движения (8.21).

Функцией Ляпунова, характеризующей устойчивость режима  $x^{\omega 0}(t)$  оптимально функционирующей ВРС, является превышение разности нелинейных оценок эффективности функционирования водохранилищ системы в возмущенном и исходном режимах над линейной аппроксимацией их с коэффициентами, соответствующими невозмущенному режиму

$$V_B^{\omega}(q_J^{\omega}(t), t) = \sum_{i \in J} \int_0^{\infty} \left[ f_i^{\omega}(q_i^{\omega}(\tau) + x_i^{\omega 0}(\tau), \tau) - f_i^{\omega}(x_i^{\omega 0}(\tau), \tau) - \frac{\partial f_i^{\omega}(x_i^{\omega 0}(\tau), \tau)}{\partial x_i^{\omega}(\tau)} q_i^{\omega}(\tau) \right] d\tau. \quad (8.27)$$

определяемая равенством (8.27), положительно определенная функция  $V_B^{\omega}(q_J^{\omega}(t), t)$ , формирующая ее функций  $f_i^{\omega}(x_i^{\omega}(t), t)$ , втя бы одна из которых в окрестности точки  $x_i^{\omega 0}(t)$  - нелинейная

$W_B^{\omega}(q_J^{\omega}(t))$  ко-

функция  $V_B^{\omega}(q_J^{\omega}(t), t)$  для всех моментов времени  $t$ , начиная с некоторого  $t_0$ , может быть принята функция

$$W_B^{\omega}(q_J^{\omega}(t)) = \frac{1}{H} \sum_{i \in J} \left[ \tilde{f}_i^{\omega}(q_i^{\omega}(t) + x_i^{\omega 0}(t)) - \tilde{f}_i^{\omega}(x_i^{\omega 0}(t)) - \frac{\partial \tilde{f}_i^{\omega}(x_i^{\omega 0}(t))}{\partial x_i^{\omega}(t)} q_i^{\omega}(t) \right],$$

где  $H = \int_{t_0}^{\infty} \eta(\rho(\tau), \tau) d\tau$ ,  $\rho(t)$

что и функция Ляпунова

Функция

делена в силу отмеченной выше выпуклости по [Рокафеллар, 1973].

В качестве граничной положительно определенной функции которая не зависит явно от времени и аппроксимирует снизу функцию Ляпунова

(8.28)

дисконтирующий множитель. Функция

$$q_J^{\omega}(t)$$

обращается в нуль на тех же векторах

$V_B^{\omega}(q_J^{\omega}(t), t)$ , и положительна в области, где  $V_B^{\omega}(q_J^{\omega}(t), t) > 0$ . Так как функции  $f_i^{\omega}(x_i^{\omega}(t), t) = \tilde{f}_i^{\omega}(x_i^{\omega}(t)) \cdot \eta(\rho(t), t)$  и  $\eta(\rho(t), t) < 1$  для всех  $t \in [T_0, \infty)$ ,

то для всех

$t$ , больших некоторого,  $t_0$ ,  $W_B^{\omega}(q_J^{\omega}(t)) < V_B^{\omega}(q_J^{\omega}(t), t)$ .

Функция Ляпунова  $V_B^{\omega}(y_J^{\omega}(t), t)$  определяемая равенством (8.27), по построению допускает бесконечно малый высший предел как превышение разности между приращениями значений нелинейной выпуклой функции на выпуклом

$\Delta \pi_B^{\omega}$  над их оптимальными значениями и линейной аппроксимацией

множестве

$$V^{\omega}(q_J^{\omega}(t), t)$$

этих приращений.

Полная производная функции  
равна (27), равна

по времени, определяемой равен-

$$\frac{dV_B^\omega(q_i^\omega(t), t)}{dt} = \sum_{i \in J} \left[ q_i^\omega(t) \frac{\partial f_i^\omega(x_i^{\omega 0}(t), t)}{\partial q_i^\omega(t)} - f_i^\omega(y_i^\omega(t) + x_i^{\omega 0}(t), t) + f_i^\omega(x_i^{\omega 0}(t), t) \right] + \sum_{i \in J} \frac{dq_i^\omega(t)}{dt} \times \int_t^\infty \left[ \frac{\partial f_i^\omega(q_i^\omega(\tau) + x_i^{\omega 0}(\tau), \tau)}{\partial q_i^\omega} - \frac{\partial f_i^\omega(x_i^{\omega 0}(\tau), \tau)}{\partial q_i^\omega} \right] d\tau.$$

$f_i^\omega(x_i^{\omega 0}(t), t)$  по  $x_i^{\omega 0}(t)$

силу выпуклости функций

тели  $\frac{dq_i^\omega(t)}{dt}$

$\delta_i^\omega(t)$  Первое слагаемое правой части равенства (8.29) отрицательно определено в

уравнений (8.21) равны

. Во втором слагаемом - множи-

производные приращений запасов в складах сети  $T(J, S)$ ,

имити-

рующие приращения объемов воды в водохранилищах, в соответствии с системой

интенсивности поступления водных ресурсов в

водохранилища или изъятия из них. Интегралы второго слагаемого представляют собой суммы приращений оптимальных двойственных переменных в вершинах сети  $T(J, S)$  и, как следует из условий оптимальности (8.26), удовлетворяют соотношениям

$$\Delta_{i0}^\omega(t) = \int_t^\infty \left[ \frac{\partial f_i^\omega(q_i^\omega(\tau) + x_i^{\omega 0}(\tau), \tau)}{\partial q_i^\omega(\tau)} - \frac{\partial f_i^\omega(x_i^{\omega 0}(\tau), \tau)}{\partial q_i^\omega(\tau)} \right] d\tau = [\alpha_i^\omega(t) - \alpha_i^{\omega 0}(t)] + \int_t^\infty \gamma_i^\omega(\tau) [\alpha_i^\omega(\tau) - \alpha_i^{\omega 0}(\tau)] d\tau + \int_t^\infty [d\underline{\lambda}_i^\omega(\tau) - d\underline{\lambda}_i^{\omega 0}(\tau)] - \int_t^\infty [d\bar{\lambda}_i^\omega(\tau) - d\bar{\lambda}_i^{\omega 0}(\tau)] d\tau \quad \text{яв-} \quad (8.30)$$

Потенциалы вершин - оптимальные двойственные переменные

являются дифференциальными экономическими оценками изменения эффективности оптимально функционирующей ВХС при изменении интенсивности поступления водных ресурсов (8.25). В дефицитных ВХС, элементы которых испытывают недостаток водных ресурсов, приращения потенциалов вершин

$\Delta \alpha_i^\omega(t) = \alpha_i^\omega(t) - \alpha_i^{\omega 0}(t)$  имеют знаки, противоположные знакам  $\frac{dq_i^\omega(t)}{dt} = \delta_i^\omega(t)$ ,

так как с уменьшением объемов водных  $\underline{\lambda}_i^\omega(t)$  ресурсов в водохранилищах эффективность их использования убывает.

Значения двойственных оценивающих влияние ограниче-

$\underline{\lambda}_i^\omega(t)$  переменных

ний снизу

допустимых объемов ( $\delta_i(t) > 0$ ) водных ресурсов в водохранилищах, при увеличении притоков к ним

$\bar{\lambda}_i^\omega(t)$

могут только уменьшиться, а двойствен-

ные переменных

оценивающих влияние ограничений сверху - только уве- ( $\delta_i(t) < 0$ )

значения

$\underline{\lambda}_i^\omega(t)$  могут только возрасти, а  $\bar{\lambda}_i^\omega(t)$  личиться. И наоборот, при заборе воды из водохранилищ

только уменьшиться. Это означает, что

для дефицитных ВХС знак  $\Delta_{i0}^\omega(t)$  противоположен знаку  $\delta_i^\omega(t)$  и, следовательно, второе слагаемое в равенстве (8.29) также отрицательно

определено.

Таким образом, положительно определенная функция  $V_B^\omega(q_j^\omega(t), t)$  определяемая равенством (8.27), для дефицитных ВРС обладает производной  $\frac{dV_B^\omega(q_j^\omega(t), t)}{dt}$ , отрицательно определенной на множестве  $\Delta\pi_B^\omega$  выделяемом неравенством (8.19), в силу системы дифференциальных уравнений возмущенного движения (8.21). Функция  $V_B^\omega(q_j^\omega(t), t)$  допускает бесконечно малый высший предел. Она удовлетворяет условиям теоремы Ляпунова об асимптотической устойчивости [Колмановский, Носов, 1981; Четаев,  $\Delta\pi_B^\omega$  1965]. В выделении множества

$x_i^{\omega 0}(T^0)$  моделирующие фигурировали любые значения запасов складов начальные значения объемов водных ресурсов в водохранилищах и  $x_s^{\omega 0}(t)$ , потоков в дугах соответствующих расходам водных ресурсов, поступающих к пользователям, на участки рек и каналов на полуинтервалах первоначального запаздывания. Это означает, что при реализации стохастических условий  $\omega \in \Omega$  режим оптимально функционирующей ВХС, испытывающей дефицит водных ресурсов, асимптотически устойчив в целом.

Построенные таким образом функции Ляпунова  $V_B^\omega(q_j^\omega(t), t)$  для всех  $\omega \in \Omega$  совместно доказывают асимптотическую устойчивость в целом режимов оптимально функционирующих ВХС, испытывающих дефицит водных ресурсов. Это означает, что оптимально функционирующие ВХС, испытывающие дефицит водных ресурсов, асимптотически устойчивы в целом в узком смысле, а следовательно, и в широком.

Если в ВХС присутствуют водохранилища, для некоторых значений  $x_i^{\omega 0}(T^0)$  которых эффективность функционирования при увеличении объемов водных ресурсов в них падает (например, происходит подтопление окружающих территорий), то знаки приращений потенциалов соответствующих вершин  $\Delta a_i^\omega(t)$  совпадают со знаками приращений притоков  $\delta_i^\omega(t)$ . В этом случае знаки первых двух слагаемых в правой части выражения (8.30) совпадают со знаками  $\delta_i^\omega(t)$ . Это может повлечь за собой совпадение знаков  $\delta_i^\omega(t)$  и интеграла во втором слагаемом в  $\frac{dV_B^\omega(q_j^\omega(t), t)}{dt}$

формуле (8.29), описывающей производную функции Ляпунова и, следовательно, отсутствие свойства отрицательной определенности этой функции. В этом случае множества режимов функционирования ВРС могут содержать зоны неустойчивости. Их наличие или отсутствие выявляется из соотношений между первым неположительным и вторыми, возможно положительными, слагаемыми правой части равенства (29).

Для ВХС, оценки эффективности функционирования всех водохранилищ которых описываются линейными функциями  $f_i^\omega(x_i^\omega(t), t)$  функция Ляпунова

$$f_i^\omega(x_i^\omega(t), t)$$

$V_B^\omega(q_j^\omega(t), t)$ : сформированная по правилу (8.27), обращается в  
 $\Delta\pi_B^\omega$ . ноль для всех  
 $q_j^\omega(t)$  из множества

В этом случае не представляется возможным оценивать устойчивость режимов функционирования ВРС.

### 8.5. Устойчивость управления качеством водных ресурсов

Управление качеством водных ресурсов при заданных режимах их использования в различных реализациях стохастических условий

$A^\omega$ , моделируется задачами  $C^\omega$  - частным случаем задач переменными которых являются потоки

$y_r^\omega(t)$ ,  
 ими *Задача*  $C^\omega$  массы примесей, содержащихся в воде.

В задаче  $C^\omega$  оптимальному режиму функционирования ВРС соответствует вектор  $y^{\omega 0}(t)$ .  $G_C^\omega$ : которое выделяется линейными ограничениями (8.3)-(8.6), (8.8), (8.10), (8.12)—(8.15) (присутствующие

в равенствах (8.8) и (8.13) переменные задачи  $A^\omega$   $x_s^\omega(t)$  и  $x_s^\omega(t)$  в задаче  $C^\omega$  пред-  
 $y^{\omega 0}(t)$

$$\begin{aligned} F^\omega(y^\omega) &= \sum_{r \in R=J \cup S} F_r^\omega(y_r^\omega) = \sum_{r \in R} \int_{T_0}^{\infty} f_r^\omega(y_r^\omega(t), t) dt = \\ &= \sum_{r \in R} \int_{T_0}^{\infty} \eta_r(t) \tilde{f}_r^\omega(y_r^\omega(t)) dt = \sum_{r \in R} \int_{T_0}^{\infty} \eta_r(t) \tilde{\varphi}_r^\omega(y_r^\omega(t)) dt \quad C^\omega \end{aligned}$$

Для выпуклой задачи оптимального управления принадлежащий множеству

ставляют собой заданные коэффициенты). Вектор минимизирует выпуклый функционал

(8.31)

частный случай функционала (8.18).

существует сопряженная с ней двойственная задача, оптимальный вектор которой где

$$\underline{\Lambda}^{\omega 0}(t), \overline{\Lambda}^{\omega 0}(t), \beta^{\omega 0}(t),$$

$\underline{\Lambda}^{\omega 0}(t) = \{\underline{\Lambda}_{rl}^{\omega 0}(t), \underline{\Lambda}_{sl}^{k\omega 0}(t) | l \in L, r \in R, s \in S\}$ ,  
 $\overline{\Lambda}^{\omega 0}(t) = \{\overline{\Lambda}_{rl}^{\omega 0}(t), \overline{\Lambda}_{sl}^{k\omega 0}(t) | l \in L, r \in R, s \in S\}$ ,  $\beta^{\omega 0}(t) = \{\beta_{il}^{\omega 0}(t) | l \in L, i \in J\}$ , взаимосвязан с оптимальным вектором  $y^{\omega 0}(t)$  [Хранович, 2001]. Переменные

$\underline{\Lambda}_{rl}^{\omega 0}(t), \underline{\Lambda}_{sl}^{k\omega 0}(t)$  и  $\overline{\Lambda}_{rl}^{\omega 0}(t), \overline{\Lambda}_{sl}^{k\omega 0}(t)$  оценивают влияние требований, предъявляемых к качеству водных ресурсов. Они показывают, на сколько изменяются оценки эффективности функционированием ВРС при изменении диапазонов, выделяемых условиями (8.3)—(8.5) и (8.8), допустимых величин масс примесей, содержащихся в водных ресурсах. Эти переменные неотрицательны. Одновременно они не могут быть положительными, так как

оценивают требования, предъявляемые к качеству водных ресурсов сверху и снизу.

Переменные  $\beta_{ii}^{\omega_0}(t)$

- потенциалы вершин - дифференциальные оценки качества водных ресурсов показывают, на сколько изменятся результаты оптимально-

го функционирования ВХС при удельных изменениях масс примесей в водохранилищах

$$\beta_{il}^{\omega 0}(t) = \frac{\partial F^{\omega}(y^{\omega 0})}{\partial y_{il}^{\omega}(t)} = \frac{\partial F_i^{\omega}(y_i^{\omega 0})}{\partial y_{il}^{\omega}(t)}. \quad (8.32)$$

Их значения удовлетворяют условиям оптимальности, аналогичным (8.26),

$$\beta_{il}^{\omega 0}(t) = \int_t^{\infty} \left[ \frac{\partial}{\partial y_{il}^{\omega}(\tau)} f_i^{\omega}(y_i^{\omega 0}(\tau), \tau) - \sum_{\gamma \in L} A_i^{\gamma \omega}(\tau) \beta_{i\gamma}^{\omega 0}(\tau) \right] d\tau - \int_t^{\infty} \underbrace{\text{Возмущения}}_{C^{\omega}} u_{il}^{\omega}(t) = y_{il}^{\omega}(t) - y_{il}^{\omega 0}(t) \Delta \pi_C^{\omega} \quad (8.33)$$

ния, описываемого задачей

оптимального режима функционирова-

вы-

принадлежат  $y_{il}^{\omega 0}(t)$  и  $y_{il}^{\omega}(t)$  допустимому множеству

деляемому ограничениями (8.19), а режимы удовлетворяют системе дифференциальных уравнений возмущенного движения (8.22).

Функцией Ляпунова, характеризующей устойчивость оптимального режима при управлении качеством водных ресурсов, являются также, как и при анализе устойчивости управления их количеством, превышение разности оценок эффективности функционирования ВХС, обусловленное изменением качества воды в водохранилищах системы в возмущенном и исходном режимах, над их линейной аппроксимацией с коэффициентами, соответствующими невозмущенному режиму

$$V_C^{\omega}(u_j^{\omega}(t), t) = \sum_{i \in J} \int_t^{\infty} \left[ f_i^{\omega}(u_i^{\omega}(\tau) + y_i^{\omega 0}(\tau), \tau) - f_i^{\omega}(y_i^{\omega 0}(\tau), \tau) - \sum_{l \in L} \frac{\partial f_i^{\omega}(y_i^{\omega 0}(\tau), \tau)}{\partial y_{il}^{\omega}(\tau)} u_{il}^{\omega}(\tau) \right] d\tau. \quad (8.34)$$

Функция  $V_C^{\omega}(u_j^{\omega}(t), t)$

хотя бы одна из которых в окрестности точки  $y_i^{\omega 0}(t)$

$$V_B^{\omega}(q_j^{\omega}(t), t)$$

положительно определена в силу выпуклости функций

$$f_i^{\omega}(y_i^{\omega}(t), t)$$

нелинейная,

так же, как функция Ляпунова

описывающая устойчивость опти-

мального использования водных ресурсов, представленная в разделе 8.4.

$$V_C^{\omega}(u_j^{\omega}(t), t)$$

За граничную функцию, аппроксимирующую функцию снизу и не зависящую явно от времени, начиная с некоторого  $t_0$ , может быть принята функция

$$W_C^{\omega}(u_j^{\omega}(t)) = \frac{1}{H} \sum_{i \in J} \left[ \tilde{f}_i^{\omega}(u_i^{\omega}(t) + y_i^{\omega 0}(t)) - \tilde{f}_i^{\omega}(y_i^{\omega 0}(t)) - \sum_{l \in L} \frac{\partial \tilde{f}_i^{\omega}(y_i^{\omega 0}(t))}{\partial y_{il}^{\omega}(t)} u_{il}^{\omega}(t) \right], \quad (8.35)$$

аналогичная  $W_B^\omega(q_J^\omega(t))$  и обладающая теми свойствами, т.е. она положительно определена и обращается в нуль вместе

$$V_C^\omega(u_j^\omega(t), t).$$

Функция Ляпунова  $V_C^\omega(u_j^\omega(t), t)$ , определенная  $V_B^\omega(q_j^\omega(t), t)$

является нелинейной выпуклой функцией. Она допускает бесконечно малый высший предел.

Полная производная функции Ляпунова  $V_C^\omega(u_j^\omega(t), t)$  по времени аналогична нескольким  $V_B^\omega(q_i^\omega(t), t)$  и равна

$$\begin{aligned} \frac{dV_C^\omega(u_j^\omega(t), t)}{dt} = & \sum_{i \in J} \sum_{l \in L} \left[ u_{il}^\omega(t) \frac{\partial f_i^\omega(y_i^{\omega 0}(t), t)}{\partial y_{il}^\omega(t)} - f_i^\omega(u_i^\omega(t) + y_i^{\omega 0}(t), t) + \right. \\ & \left. + f_i^\omega(y_i^{\omega 0}(t), t) \right] + \end{aligned} \quad (8.36)$$

Первое слагаемое правой части равенства (8.36) отрицательно определено в  $\sum_{i \in J} \sum_{l \in L} \frac{du_{il}^\omega(t)}{dt} \int_t^\infty \left[ \frac{\partial f_i^\omega(u_i^\omega(\tau), \tau)}{\partial y_{il}^\omega} \cdot f_i^\omega(y_i^\omega(t), t) \cdot \frac{\partial f_i^\omega(y_i^{\omega 0}(\tau), \tau)}{\partial y_{il}^\omega} \right] d_i y_i^\omega(t)$

производные приращений запасов в складах сети

$T(J, S)$ , моделирующих приращения масс примесей в водных ресурсах водохранилищ, в соответствии с системой уравнений (8.22) равны интенсивности поступления  $\delta_{il}^\omega(t)$  по переменным  $\delta_{il}^\omega(t)$  по переменным

выпуклости

функций

слагаемое

равенства (8.36).

$$\frac{du_{il}^\omega(t)}{dt}$$

Оценим второе

множители

ния примесей в водохранилища

Интегралы второго слагаемого, как следует из условий оптимальности (8.33), представляют собой суммы приращений оптимальных двойственных переменных в вершинах сети  $r(J, S)$ , сопряженных с переменными прямой задачи, соответствующими интенсивностям поступления масс примесей в водохранилища

$$\begin{aligned} \Delta_{il}^\omega(t) = & \int_t^\infty \left[ \frac{\partial f_i^\omega(u_i^\omega(\tau) + y_i^{\omega 0}(\tau), \tau)}{\partial y_{il}^\omega(\tau)} - \frac{\partial f_i^\omega(y_i^{\omega 0}(\tau), \tau)}{\partial y_{il}^\omega(\tau)} \right] d\tau = [\beta_{il}^\omega(t) - \beta_{il}^{\omega 0}(t)] + \\ & + \int_t^\infty \sum_{\gamma \in L} A_i^{\gamma \omega}(\tau) [\beta_{i\gamma}^\omega(\tau) - \beta_{i\gamma}^{\omega 0}(\tau)] d\tau + \\ & + \int_t^\infty [d\Delta_{il}^\omega(\tau) - d\Delta_{il}^{\omega 0}(\tau)] - d_{il} \int_t^\infty [d\bar{\Delta}_{il}^\omega(\tau) - d\bar{\Delta}_{il}^{\omega 0}(\tau)]. \end{aligned} \quad (8.37)$$

Значения оптимальных двойственных переменных  $\underline{\Lambda}_{il}^{\omega}(t)$  оценивающих влияние ограничений снизу  $\underline{y}_{il}^{\omega}(t)$  примесей в водохранилищах, при увеличении их поступления  $\delta_{il}^{\omega}(t) > 0$  могут только уменьшиться, а двойственных переменных  $\bar{\Lambda}_{il}^{\omega}(t)$

оценивающих влияние ограничений сверху  $\bar{y}_{il}^{\omega}(t)$  только увеличиться. При изъятии водных ресурсов из водохранилищ и(или) их  $(\delta_{il}^{\omega}(t) < 0)$ , значения  $\underline{\Lambda}_{il}^{\omega}(t)$  могут только возрасти, а  $\bar{\Lambda}_{il}^{\omega}(t)$  - только уменьшиться. Это означает, что знаки третьего и четвертого слагаемых правой части равенства (8.37) противоположны знаку  $\delta_{il}^{\omega}(t)$  и, следовательно, они отрицательно определены.

Потенциалы вершин - оптимальные двойственные переменные  $\beta_{il}^{\omega}(t)$  представляют собой дифференциальные экономические оценки изменения эффективности оптимально функционирующей ВХС при изменении величин масс примесей в водохранилищах в соответствии с формулой (8.32). Их приращения  $\Delta\beta_{il}^{\omega}(t) = \beta_{il}^{\omega}(t) - \beta_{il}^{\omega 0}(t)$  в зависимости от вида примесей имеют знаки, дающими со знаками  $\delta_{il}^{\omega}(t)$  совпадающими или противоположными им.

Увеличение масс загрязняющих веществ в водохранилищах приводит к снижению эффективности функционирования ВХС и, следовательно, к росту значений двойственных переменных  $\beta_{il}^{\omega}(t)$

И наоборот, сокращение масс загрязняющих веществ в водохранилищах приводит к повышению эффективности функционирования ВХС и повышению обусловленных этим значений  $\beta_{il}^{\omega}(t)$

Этот случай, основной при рассмотрении влияния примесей на эффективность функционирования ВХС, характеризуется совпадением знаков  $\delta_{il}^{\omega}(t)$  и  $\Delta\beta_{il}^{\omega}(t)$ , что влечет положительную определенность первых двух слагаемых правой части (8.37).

Поступление полезных примесей в водные объекты (например, кислорода) повышает эффективность функционирования ВХС, а их изъятие снижает результативность использования водохранилищ. В этом случае знаки  $\delta_{il}^{\omega}(t)$  и  $\Delta\beta_{il}^{\omega}(t)$

противоположны, и следовательно, первые два слагаемые правой части (8.37) отрицательно определены.

Таким образом, знак второго слагаемого первой части равенства (8.36), которм описывается полная производная функции Ляпунова по времени  $\frac{dV_c^{\omega}(u_j^{\omega}(t), t)}{dt}$ , может быть как отрицательным, так и положительным. Он зависит

от вида примесей в воде водохранилищ, а также соотношений между влиянием требований, предъявляемых к качеству водных ресурсов, и оценками результативности функционирования водохранилищ при изменении в них масс примесей.

Знакоопределенность производной функции Ляпунова  $\frac{dV_c^\omega(u_j^\omega(t), t)}{dt}$  формируется соотношением между первым и вторым слагаемым правой части равенства (36). Первое слагаемое отрицательно определено. Знак второго слагаемого может быть положительным или отрицательным. Поэтому множество значений показателей качества водных ресурсов может содержать подмножества, на которых производная функции Ляпунова определена либо отрицательно, либо положительно. Это означает, что функционирование ВХС при управлении качеством водных ресурсов может содержать зоны устойчивости и неустойчивости.

### 8.6. Заключение

Рассмотрена устойчивость режимов оптимального использования водных ресурсов без учета их качества и управления качеством водных ресурсов при заданных их расходах и объемах. Исследование основывается на построении и анализе свойств функций Ляпунова, характеризующих устойчивость функционирования ВХС - динамических управляемых систем. Показана асимптотическая устойчивость в целом режимов оптимального использования водных ресурсов без учета их качества в дефицитных ВХС. Во всех остальных случаях в зависимости от значений параметров элементов и требований, предъявляемым к расходам, объемам и качеству водных ресурсов, множество оптимальных режимов ВХС может содержать зоны устойчивости и неустойчивости.

Приведенное выше формирование функции Ляпунова при исследовании оптимального использования водных ресурсов без учета их качества или управление качеством водных ресурсов при заданных их расходах и объемах основывается на

выпуклости целевых функционалов и линейности  $B^\omega$  и  $C^\omega$ , ограничений задач оптимального управления описывающих функционирование ВХС в этих случаях. Задачи  $A^\omega$  модели совместного управления количеством и качеством водных  $F^\omega(x^\omega, y^\omega)$

ресурсов такими свойствами не обладают. Их целевые функционалы

невыпуклые. Также невыпуклые их допустимые множества  $G_A^\omega$  из-за билинейности ограничений типа равенства (8.13). Сложности исследования устойчивости функционирования ВХС, описываемого этими многоэкстремальными задачами оптимального управления, еще предстоит преодолеть.

## Глава 9

# УПРАВЛЕНИЕ СОВМЕСТНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

### 9.1. Концепция

Поверхностный сток и подземные воды образуют единый комплекс природных водных ресурсов. Однако, несмотря на провозглашенный принцип единства природных вод, они изучаются, оцениваются и эксплуатируются, как правило, как самостоятельные источники водоснабжения. На практике поверхностные и подземные воды рассматриваются чаще всего как альтернативные источники водных ресурсов. Подземные воды, учитывая ограниченность их запасов и меньшую подверженность загрязнению, закреплены законом для использования на нужды хозяйственно-питьевого водоснабжения, в то время как каких-либо ограничений на использование речного стока нет. Поэтому основная тяжесть в решении проблемы водообеспечения народного хозяйства до сих пор ложилась на поверхностные водные ресурсы.

Рост водопотребления неизбежно приводит к увеличению водоотведения в поверхностные источники и, как следствие, к прогрессирующему загрязнению поверхностных водотоков и водоемов. В результате этого многие поверхностные источники оказались в положении количественного и качественного истощения. Следствием этого является все большее вовлечение ресурсов подземных вод для решения проблем водообеспечения. Многие населенные пункты переведены на водоснабжение из подземных источников, в то время как крупные города, в основном, снабжаются водой из поверхностных источников. При этом в крупных городах также локально используются подземные воды, и не только на нужды коммунально-бытового водоснабжения. Многие предприятия и организации имеют свои собственные скважины для использования подземных вод на производственные нужды. Поскольку, за редким исключением, не уделялось внимание созданию систем технического водоснабжения, возникла парадоксальная ситуация. При провозглашенных принципах использования подземных вод только для коммунально-бытовых нужд вода из подземных горизонтов идет на нужды промышленности, а вода из более загрязненных поверхностных источников, пройдя дорогостоящие очистные сооружения, поступает для покрытия потребностей населения в питьевой воде.

Раздельное использования ресурсов поверхностных и подземных вод приводит к их нерациональной эксплуатации и вызывает отрицательные экологические последствия. Создание водохранилищ и искусственных водотоков (каналов) для перераспределения речного стока во времени и пространстве, наряду с положительным водохозяйственным эффектом, создает целый ряд экологических проблем как в водоемах, так и на прилегающих территориях. Образуются большие зоны затопления и подтопления территорий. Весьма существенно влияют на функционирование водных экосистем и на формирование качества воды изменение скорости водообмена, связанного с регулированием стока, и мелководья водохранилищ. Существует зависимость между увеличением располагаемых водных ресурсов при регулировании стока и ростом сбросных вод, поступающих в водотоки и водоемы. Поэтому, чем выше степень использования водных ресурсов зарегулированных водотоков, тем больше вероятность его загрязнения возвратными водами и рекреационной деятельностью. Следует также отметить, что водохозяйственная эффективность регулирования поверхностного стока снижается по мере роста его зарегулированное™. Это означает, что приращение гарантированной отдачи уменьшается при росте коэффициента регулирования стока, а глубина перебоев и их продолжительность в годы, выходящие за пределы расчетной обеспеченности, увеличивается. Таким образом, удовлетворение дополнительных требований со стороны народного хозяйства к водным ресурсам ещё больше усугубляет отрицательные явления, связанные с регулированием речного стока. Любое увеличение водоотдачи речных ВХС приводит либо к необходимости создания новых водохранилищ, либо привлечения водных ресурсов из других бассейнов. Эти мероприятия являются весьма нежелательными, прежде всего по экологическим соображениям.

Интенсивное использование подземных вод, ресурсы которых весьма ограничены, также приводит к отрицательным последствиям для окружающей среды. При длительной и постоянной работе подземных водозаборов происходят существенные нарушения в режиме и балансе подземных вод и в их связи с поверхностными водами, а также в геологической среде и экологической обстановке. При использовании подземных вод в качестве постоянного источника водоснабжения происходит сработка их эксплуатационных запасов, после чего приходится отыскивать новые источники водоснабжения. Перевод водоснабжения на более глубокие горизонты напорных вод при их интенсивной эксплуатации также экологически небезопасен. При длительной эксплуатации происходит значительное увеличение градиентов фильтрации, имеют место случаи привлечения в наиболее ценные для питьевого водоснабжения водоносные горизонты агрессивных пресных и загрязненных грунтовых вод. В ряде случаев отмечается интенсификация карстовых и суффозионных процессов, приводящих к образованию новых карстовых воронок и просадок земной поверхности.

Независимое использование ресурсов поверхностных и подземных вод для решения проблем водообеспечения развивающейся экономики и возрастающих социальных потребностей уже привело к серьезным водохозяйственным, гидрогеологическим и экологическим проблемам, в ряде районов страны развитие сие-

тем водоснабжения достигло экологического предела. Все это привело к необходимости разработки концепции совместного управления ресурсами поверхностных и подземных вод. Ее основная цель состоит в том, чтобы добиться удовлетворения растущих потребностей в воде за счет увеличения отдачи существующих ВХС без создания новых водохранилищ. При этом происходит увеличение вероятности наступления перебойных периодов, обусловленных естественными колебаниями речного стока, однако компенсация дефицита воды, возникающего в маловодных условиях, осуществляется за счет эксплуатации ресурсов подземных вод, которые включаются в единую систему водоснабжения. В многоводные периоды, когда водообеспечение может осуществляться из поверхностных источников, забор воды из подземных источников прекращается или снижается до технически необходимого минимума. В эти периоды происходит естественное восполнение подземных горизонтов.

Система совместного управления ресурсами поверхностных и подземных вод обладает экологическими преимуществами перед их независимой эксплуатацией. Они состоят в том, что повышение водоотдачи существующих ВХС происходит без создания новых водохранилищ и без интенсивной сработки запасов подземных вод. Такое управление может быть осуществлено путем создания технических систем водоснабжения, в которых подача воды пользователям может производиться равноправно как из источников поверхностных, так и подземных вод.

Проблема совместного управления поверхностными и подземными водами значительно менее изучена, чем проблемы управления речным стоком и месторождениями подземных вод (МПВ) при их автономной работе, которые она включает как частные случаи. Недостаточная разработанность этой проблемы обусловлена не только сложностью решаемых в ней вопросов, но и традиционно различными подходами к управлению ресурсами поверхностных и подземных вод. В основу управления ресурсами поверхностных вод положен принцип соблюдения нормируемой надежности гарантированной отдачи, реализуемый в виде диспетчерских правил. Управление ресурсами подземных вод основывается на принципе «не навреди», реализуемом в виде ограничений на допустимые расходы из скважинных водозаборов, обеспечивающих непрерывную работу месторождения в течение определенного периода времени.

Задача обоснования режимов работы ВХС, использующих совместно ресурсы поверхностных и подземных вод, значительно сложнее проблем отдельного управления поверхностными и подземными водами. При ее решении приходится рассматривать огромное количество вариантов гидрологических, гидрогеологических и водно-ресурсных параметров системы. Для каждого из вариантов необходимо определить наиболее эффективный режим работы системы, то есть установить порядок сработки и наполнения водохранилищ, режим забора воды из подземных горизонтов, распределение воды между различными водопользователями, а также характер функционирования оборудования и устройств, обеспечивающих работу системы. Особую трудность в решении этой задачи вызывает сложная взаимосвязь между поверхностными и подземными водами, зависящая не только от величины используемых ресурсов, но и от режимных характеристик водозабо-

ров и правил сработки и наполнения водохранилищ. Более того, система взаимодействия поверхностных и подземных вод - это система с памятью. Режим взаимодействия этих источников в каждый момент времени зависит не только от их состояния в данный момент, но также, в силу большой инерционности гидрогеологических процессов, от предыстории их совместной работы.

Не менее сложной проблемой, возникающей в процессе обоснования режимов работы ВХС, является вероятностный характер колебаний речного стока и ресурсов подземных вод. Сложности обусловлены в значительной степени сочетанием неопределённости поступления и использования водных ресурсов и тем, что МПВ представляют собой хранилища водных ресурсов со своеобразными динамическими характеристиками восполнения запасов и влияния отборов из МПВ на речной сток. Поэтому в данной работе управление совместным использованием поверхностных и подземных вод наряду с ориентирами показателей поверхностных водных ресурсов оперирует ориентирами ресурсов МПВ, а также ориентирами величин редукации речного стока и режимов пополнения МПВ.

## 9.2. Подход к выработке стратегий

Для решения проблемы управления совместным использованием поверхностных и подземных вод целесообразно рассматривать математические модели, отражающие гидрологические, гидрогеологические и водно-ресурсные особенности, а также условия функционирования рассматриваемой системы. Создание и совершенствование моделей шло параллельно с развитием методологии совместного управления ресурсами поверхностных и подземных вод. В первых моделях подземные воды выступали как дополнительный, не связанный с поверхностными водами ресурс, используемый в дефицитные периоды [Moulders, Jenkins, 1969; Young, Brodehoeft, 1972]. Возможность уменьшения дефицита оросительной воды за счет включения подземных источников показала перспективность управления совместным использованием поверхностных и подземных вод. В частности, для покрытия дефицита водности потребовалось в несколько раз меньше воды из подземных источников, чем из речной сети. Эти идеи получили дальнейшее развитие в работах [Taylor, Luckey, 1974; Клюквин и др., 1981; Ковалевский, 2001, 2003], где была показана целесообразность исследования проблемы с позиций взаимодействия поверхностных и подземных вод.

Особенно актуальна проблема совместного управления ресурсами поверхностных и подземных вод в условиях их тесной взаимосвязи, так как в этом случае водозабор из подземных источников приводит к редукации (ущербу) поверхностного стока. Трудности, связанные с моделированием этого явления, обусловленные последствием редукации поверхностного стока и восполнения запасов подземных вод по отношению к вызвавшему их водозабору, были преодолены в работе [Концевовский, Минкин, 1986]. В этой работе показано, что влияние режима отбора подземных вод на поверхностный сток и пополнение ресурсов подземных вод может быть представлено в виде стационарной линейной системы. Входом в

эту систему служит отбор воды из МПВ, выходами - редуция (ущерб) поверхностного стока и восполнение ресурсов МПВ как реакции на вызвавший эти процессы отбор. На основе такого представления взаимосвязей поверхностных и подземных вод была разработана модель управления ресурсами подземных вод для покрытия дефицитов водных ресурсов, образовавшимся при попытках управлять только поверхностным стоком [Концевовский, Минкин, 1989]. Этот подход был развит и доведен до конкретных результатов при решении задачи покрытия дефицита использования поверхностных вод подземными водами в Московском регионе [Великанов и др., 1994]. В частности, было продемонстрировано, что совместное использование поверхностных и подземных водных ресурсов в единой системе водоснабжения позволяет повысить гарантированную отдачу ВХС при сохранении требуемой надежности водоотдачи без увеличения регулирующей емкости водохранилищ. Тем самым была показана возможность и перспективность совместного использования ресурсов поверхностных и подземных вод в объединенных системах водоснабжения.

В данной работе поверхностные и подземные воды рассматриваются как равноправные взаимодополняющие источники водных ресурсов. Для управления ими предложена математическая модель оптимального функционирования ВХС, которая описывается задачей В, являющейся расширением

задачи  $B^{\omega}$ . В задаче  $B^{\omega}$  представленной в главе 8 взаимосвязи поверхностного и подземного стоков в явном виде не представлены. При рассмотрении совместного использования поверхностных и подземных вод учет таких связей необходим. Он отражен в описанных в работе [Концевовский, Минкин, 1989] математических моделях использования подземных вод как дополнительных источников для покрытия дефицитов водных ресурсов. Последние также имеют потоковую структуру, что дает возможность интегрировать их с потоковыми моделями.

В задаче В учитываются все возможные реализации стохастических  $\omega \in \Omega$  условий К переменным  $x(t)$ , соответствующим реальным расходам и объемам водных ресурсов, добавляются переменные  $X(t)$ , моделирующие ориентированность использования водных ресурсов элементами ВХС. Интегранты  $f(x(t), t)$  расходов и объемов. Соответственно изменяются функции,

целевых функций задачи характеризующие эффект в задаче В заменяются на функции более общего вида  $f(X(t), x(t), t)$ . Существенным дополнением в задаче В является включение в неё аналогов МПВ - фрагментов сети  $T(J, S)$ , начертание которой согласуется со схематическим изображением ВХС. Представление этих фрагментов в модели, описываемой задачей В, содержится ниже в разделе 9.3.

В задаче В, описывающей оптимальное функционирование ВХС, оптимальным режимам соответствует оптимальный вектор  $Jt^{\circ}, x^{\circ}$ , минимизирующий функционал затрат, зависящих от потоков в сети  $r(J, S)$  в течение расчётного периода  $T$ .

Вектор  $Jt^{\circ}, x^{\circ}$  с составляющими  $x^{\circ} = \{x_r^{\omega 0}(t) | r \in R, \omega \in \Omega, t \in T\}$  - вектором реализуемых потоков в дугах и запасов в вершинах, и вектором гарантированных потоков и запасов - минимизирует функционал

$$X^0 = \{X_r^0(t) | r \in R, t \in T\}$$

$$f(x) = \sum_{r \in R = S \cup J} f_r(X_r, x_r) = \sum_{r \in R} \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f_r^\omega(X_r, x_r^\omega). \quad (9.1)$$

Минимум этого функционала отыскивается на множестве  $GB$ , сформированном условиями, включающими: уравнения неразрывности потоков в вершинах сети

$$\dot{x}_i^\omega(t) = \sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega(t) x_s^\omega(t - \theta_s^\omega) - \sum_{s \in S_i^-} x_s^\omega(t) - \gamma_i^\omega(t) x_i^\omega(t) + b_i^\omega(t), \quad i \in J, \omega \in \Omega, \quad (9.2)$$

$$\pi_{rq}^\omega = \left\{ x_{rq}^\omega(t) \mid \underline{x}_r^\omega(t) \leq x_r^\omega(t) \leq \bar{x}_r^\omega(t) \right\}, \quad r \in R = J \cup S, \quad (9.3)$$

ограничения величин потоков и запасов, выделяющие множества

диапазоны потоков и запасов, моделирующих ориентировочные значения объемов и расходов водных ресурсов

$$\pi_{rX} = \left\{ X_r(t) \mid \underline{X}_r(t) \leq X_r(t) \leq \bar{X}_r(t) \right\}, \quad r \in R = J \cup S, \quad (9.4)$$

а также начальные условия

$$x_i^\omega(t) = x_i^0(t) \quad \text{для } t \in [T_0 - \theta^\omega, T_0], s \in S,$$

$$x_i^\omega(T_0) = x_i^0(T_0), \quad i \in J. \quad (9.5)$$

Задача В является двухэтапной задачей стохастического оптимального управления. В ней стратегическими переменными первого этапа, выбираемыми при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, выступают гарантированные величины потоков в дугах и запасов в складах  $X_r$ . Tактическими переменными второго этапа, выбираемыми при известной реализации стохастических

$x_r^\omega$

, соответствующие реализуе-

условий, являются значения потоков и запасов

мым расходам и объемам воды в моделируемой ВХС. Включение фрагментов сети  $\Gamma(l, S)$ , моделирующих МПВ, не нарушает потоковую структуру задачи В, однако усложняет её, добавляя к автономным источникам потоков неавтономные источники, мощности которых соответствуют функциям отборов из МПВ.

### 9.3. Отображение месторождений подземных вод в модели

Включение МПВ и их взаимосвязей в модель В основывается на описании влияния режимов эксплуатации на поверхностный сток и на режимы пополнения ресурсов МПВ в виде стационарной линейной системы [Концевовский, Минкин, 1986, 1989; Nantush, 1976]. Это дает возможность описывать изменения поверхностного стока и ресурсов МПВ в виде линейных комбинаций отборов из МПВ, причем реакции на водоотбор зависят только от продолжительности интервала времени между рассматриваемым моментом и моментом водоотбора.

Модель совместного управления взаимосвязанными ресурсами поверхностных и подземных вод, наряду с элементами сети  $\Gamma(Y, S)$ , соответствующими источникам водохранилищами, пользователям, участкам рек и каналов, содержит также фрагменты сети, моделирующие МПВ. Фрагменты, изображающие МПВ,

включают вершины, в которых располагаются склады, источники и стоки, а также дуги - связи с остальной частью сети. Пример такого фрагмента - аналога МПВ - приведен на рис. 9.1. Склады соответствуют подземным резервуарам.

$x_i^\omega(t)$  Запасы в

них изображают значения объемов воды, которые могут быть изъяты из месторождения. Условия эксплуатации налагают ограничения на величины этих

$x_i^\omega(t)$  и сверху  $\bar{x}_i^\omega(t)$ , которые определяются гидрогеологическими и техниче-  
запасов. В модели они задаются в виде неравенств (9.3) с ограничениями снизу  
скими особенностями МПВ, а также экологическими требованиями

прилегающих территорий. Наряду с запасами  $x_i^\omega(t)$

в модель вводятся переменные  $X(t)$ , соответствующие ориентирам объемов водных ресурсов в МПВ.

$$f(\bar{X}(t), x(t), t).$$

функционирования МПВ оценивается затратами Эффективность

Возможные потери

воды из МПВ учитываются третьим слагаемым правой части равенства (9.2).

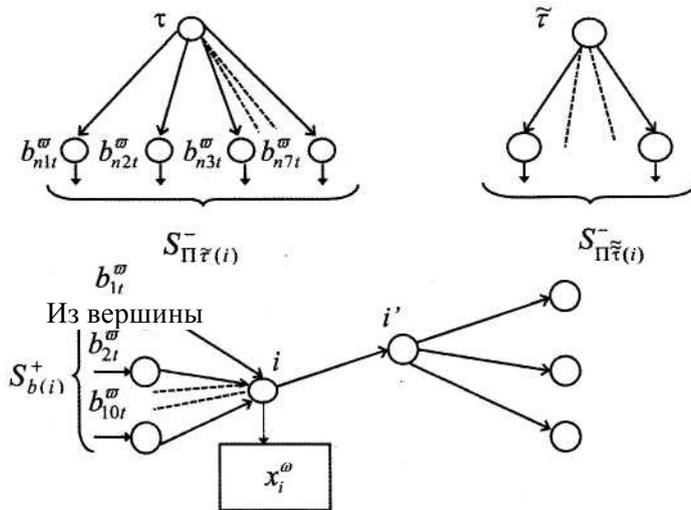


Рис. 9.1. Изображение в модели месторождения подземных вод

$(i, i')$  соединяющая  
 $i'$  Поток этой дуги

$\Gamma$ -ю вершину с дополнительно введенной вершиной

$x_s^\omega(t) = x_{i,i'}^\omega(t)$  изображает расход воды, отбираемой из  $\bar{x}_s^\omega(t)$  и соответствующей

$$(q_{s\alpha}^\omega(t) = 0) \text{ и сверху величиной}$$

производительности МПВ, которая определяется режимом  $k_s^\omega(t)$  бора и гидрологическими условиями. Коэффициент усиления этой дуги

ничена снизу нулю.

нулем в которую заходит дуга  $(i, i')$

исходят дуги, изображающие

запаздывание  $i'$   
Из вершины

пользователей подземных вод. Они заходят в вершины - аналоги створов водоотведения этих пользователей. Поток таких дуг  $x_s^\omega(t)$  моделируют расходы воды,

поступающей из МПВ к соответствующим  $\underline{x}_s^\omega(t)$  и сверху  $\bar{x}_s^\omega(t)$  пользователям. Ограничения снизу

на величины  $k_s^\omega(t)$  и запаздывания  $\theta_s^\omega(t)$  потоков этих дуг, коэффициенты усиления

имеют тот же смысл, что и в дугах, изображающих пользователей, участки каналов и русел рек. Так же, как для дуг, изображающих пользователей, участки рек и каналов, в модель вводятся ориентиры - потоки изображающие гарантированные величины отборов воды из  $X_s(t) = X_{i,s'}(t)$ :

МПВ. Диапазоны их возможных значений выделяются условиями вида (9.4) с ограничениями, отражающими природные и технологические возможности использования водных ресурсов МПВ. Эффективность их функционирования оценивает-

Под влиянием отбора подземных вод происходит редукция поверхностного стока, которая может быть привязана к конечному числу створов речной сети. Из  $\tilde{i}$  и  $i$  ) отбираются потоки

вершин - аналогов этих створов (на рис. 9.1 вершины - аналоги редукции поверхностного стока по дополнительно введенным дугам,  $S_{\Pi i}^-(i)$  и  $S_{\Pi i}^-(i)$  ). С отходящим из этих вершин (на рис. 9.1 дуги множеств  $S_b^+(i)$  ). С отбором подземных вод связана его компенсация притоком воды к МПВ, которая в модели изображается в виде потоков в дугах, заходящих в вершины - аналогии МПВ (на рис. 9.1 дуги множества

Параметры этих дуг и связанных с ними элементов сети  $Y(J, S)$  соответствуют описанию влияния режимов эксплуатации МПВ на поверхностный сток и на компенсационное питание в виде стационарной линейной системы, входом которой служит  $x_s^\omega(t)$  величина отбора подземных вод  $x_{\Pi i}^\omega(t)$  и расход

компенсационного питания  $x_{bi}^\omega(t)$  выходом - редукция расхода поверхностного стока  $x_{bi}^\omega(t)$  Правомерность такого подхода показана в [Концебовский, Минкин, 1986, 1989].

В соответствии с линейным стационарным описанием взаимодействия поверхностных и подземных вод редукция расхода поверхностного стока представляется в виде

$$x_{\Pi i}^\omega(t) = \int_0^t k_{\Pi i}^\omega(\tau) x_s^\omega(t - \tau) d\tau, \quad (9.6)$$

где  $k_{\Pi i}^\omega(t)$

- коэффициент редукции (весовая функция редукции). Эта функция неотрицательна по своему физическому смыслу и соответствует отношению ущерба поверхностного стока к вызвавшему его отбору воды. Так как уменьшение объема поверхностного стока не превосходит объема вызвавшего его отбора подземных вод, то

$$\int_0^\infty k_{\Pi i}^\omega(\tau) d\tau \leq 1. \quad (9.7)$$

Типичный вид зависимости  $k_{\Pi i}^\omega(t)$  иллюстрирует рис. 9.2.

Точно так же из линейного стационарного описания влияния режимов отбора подземных вод на режимы компенсационного питания МПВ следует, что

$$x_{bi}^{\omega}(t) = \int_0^t k_{bi}^{\omega}(\tau) x_s^{\omega}(t - \tau) d\tau, \quad (9.8)$$

где  $k_{bi}^{\omega}(t)$

коэффициент компенсации (весовая функция компенсационного питания). Эта функция также неотрицательна, так как она характеризует отношение притока к МПВ к вызвавшему этот приток отбору подземных вод. Поскольку увеличение объема естественного притока воды к МПВ не превосходит объема отбора подземных вод, вызвавшего увеличение притока, коэффициенты компенсации обладают свойством

$$(9.9)$$

$$\int_0^{\infty} k_{bi}^{\omega}(\tau) d\tau \leq 1,$$

аналогичным (9.7). Типичный вид зависимости  $k_{bi}^{\omega}(t)$  напоминает он также же показан на рис. 9.2. Отличие состоит в том, что пополнение ресурсов МПВ начинается раньше, чем происходит редукция поверхностного стока.

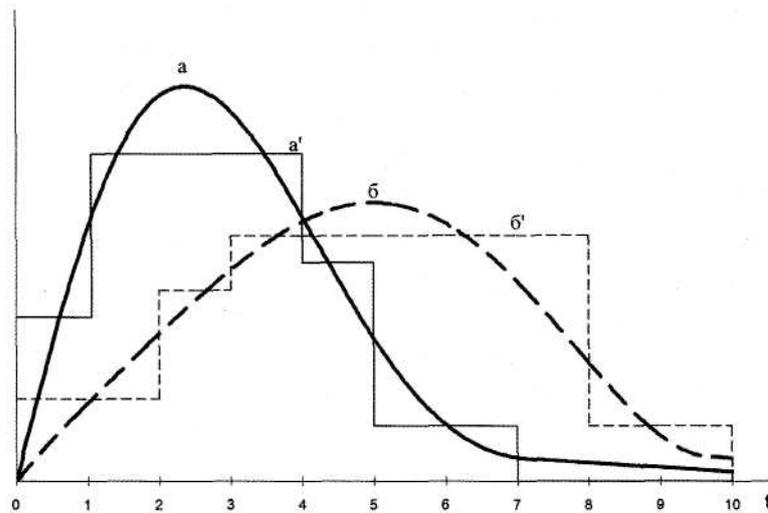


Рис. 9.2. Типичный вид зависимостей коэффициентов редукции и компенсации во времени.

а - коэффициент компенсации  $\hat{k}_{bi}^{\omega}$  б - коэффициент редукции  $\hat{k}_{\Pi i}^{\omega}$

Включение взаимосвязи поверхностных и подземных вод в модель основывается на аппроксимации коэффициентов редукции и компенсации кусочно-постоянными функциями времени  $\hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(t)$  и  $\hat{k}_{bi}^{\omega}(t)$  аналогично тому, как показано на рис. 9.2. При переходе от функций  $k_{\Pi i}^{\omega}(t)$  и  $k_{bi}^{\omega}(t)$  к функциям  $\hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(t)$  и  $\hat{k}_{bi}^{\omega}(t)$  интегралы (9.6) и (9.8) заменяются суммами

$$x_{\Pi i}^{\omega}(t) \cong \hat{x}_{\Pi i}^{\omega}(t) = \sum_{\tau_{\Pi}=1}^t \hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(\tau_{\Pi}) \int_{\tau_{\Pi}-1}^{\tau_{\Pi}} x_s^{\omega}(t-\lambda) d\lambda, \quad (9.10)$$

$$x_{bi}^{\omega}(t) \cong \hat{x}_{bi}^{\omega}(t) = \sum_{\tau_b=1}^t \hat{k}_{bi}^{\omega}(\tau_b) \int_{\tau_b-1}^{\tau_b} x_s^{\omega}(t-\lambda) d\lambda, \quad (9.11)$$

в которых все величины  $\tau_{\Pi}$  и  $\tau_b$ , «последнего» момента времени, дискретные значения, кроме, может быть,  $\hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(t)$  и  $\hat{k}_{bi}^{\omega}(t)$ , равного  $t$ , принимают соответствующие моменты времени, в

каждое слагаемое в формулах (9.10) и (9.11) отвечает участку постоянства  $\hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(t)$  и  $\hat{k}_{bi}^{\omega}(t)$ . В силу свойств (9.7) и (9.9) значения коэффициентов редукции и компенсации  $\hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(t) \rightarrow 0$  и  $\hat{k}_{bi}^{\omega}(t) \rightarrow 0$

при  $t \rightarrow \infty$ . При аппроксимации интегралов  $x_{\Pi i}^{\omega}(t)$  и  $x_{bi}^{\omega}(t)$  суммами  $\hat{x}_{\Pi i}^{\omega}(t)$  и  $\hat{x}_{bi}^{\omega}(t)$  с любой погрешностью число временных интегралов, в которых значения коэффици-

циентов в выражениях (9.10) и (9.11) отличны от нуля, конечно. Поэтому, число ненулевых слагаемых в правой части (9.10) и (9.11) также конечно.

Слагаемые правой части (9.10) и (9.11) оценивают влияние расходов отбора воды из МПВ, осуществленного во всех временных интервалах, предшествующих текущему моменту времени, на редукцию поверхностного стока и компенсационное питание в этот момент.

МПВ во временном интервале  $[\tau_{\Pi-1}, \tau_{\Pi}]$  или  $[\tau_{b-1}, \tau_b]$  будем оценивать запаздывание между отбором из и изменением расхода редук-

ции поверхностного стока и компенсационного питания в момент времени  $t$  величинами  $\theta_{\Pi\tau}^{\omega}$  и  $\theta_{b\tau}^{\omega}$ . Тогда выражения (9.10) и (9.11) принимают вид

$$x_{\Pi i}^{\omega}(t) = \sum_{\tau_{\Pi}=1}^{\tau_{\Pi}} \hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(\tau_{\Pi}) x_s^{\omega}(t - \theta_{\Pi\tau}^{\omega}) \Delta_{\Pi\tau} + \hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(\tau_{\Pi} + 1) x_s^{\omega}(t - \tau_{\Pi}) [t - \tau_{\Pi}], \quad (9.12)$$

$$x_{bi}^{\omega}(t) = \sum_{\tau_b=1}^{\tau_b} \hat{k}_{bi}^{\omega}(\tau_b) x_s^{\omega}(t - \theta_{b\tau}^{\omega}) \Delta_{b\tau} + \hat{k}_{bi}^{\omega}(\tau_b + 1) x_s^{\omega}(t - \tau_b) [t - \tau_b], \quad (9.13)$$

где  $\Delta_{\Pi\tau}$  и  $\Delta_{b\tau}$  — длительности временных интервалов  $[\tau_{\Pi-1}, \tau_{\Pi}]$  и  $[\tau_{b-1}, \tau_b]$ , на которых  $\hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(t)$  и  $\hat{k}_{bi}^{\omega}(t)$  принимают постоян-

и компенсации

$\tau_{\Pi}$  и  $\tau_b$

рых коэффициенты редукции дискретные моменты времени, непосредственно не значения;

вующие моменту  $t$ , в которых изменяются значения коэффициентов  $\hat{k}_{\Pi i}^{\omega}(t)$  и  $\hat{k}_{bi}^{\omega}(t)$  и  $\theta_{\Pi\tau}^{\omega} = \tau_{\Pi-1}$  и  $\theta_{b\tau}^{\omega} = \tau_b - 1$ .

Для определенности можно принять Равенства (9.12) и (9.13) реализуются в модели при включении в нее редукции

поверхностного стока и компенсационного питания в виде пучков из нескольких параллельных дуг, как показано на рис. 9.1. Дуги, введенные в модель для описа-

ния влияния отбора подземных вод на поверхностный сток и компенсационное питание МПВ, соответствуют слагаемым в суммах (9.12) и (9.13) с отличными от нуля коэффициентами редукции и компенсации, их число совпадает с числом ненулевых коэффициентов в (9.12) и (9.13).

Значения коэффициентов усиления дуг множества  $S_b^+(i)$  потоки которых изображают в модели компенсационное питание, совпадают со значениями коэффициентов компенсации в разложении (9.12), т.е.

$$k_s^\omega(t) = \hat{k}_{bi}^\omega(\tau_b), \quad s \in S_b^+(i), \tau_b \in \bar{T}_b, \quad (9.14)$$

$S_b^+(i)$  множество дуг, заходящих в вершину - аналог МПВ;  $\bar{T}_b$  - множество где

во временных интервалах, на которых коэффициенты компенсации  $\hat{k}_{bi}^\omega(t)$  отличны от нуля.

Дуги множества  $S_{\Pi\tau}^-(i)$

соответствуют временным интервалам, образующим

множество  $\bar{T}_\Pi$  на которых коэффициенты редукции  $\hat{k}_{\Pi i}^\omega(\pi_\Pi)$

отличны от нуля. Коэффициенты усиления дуг этого множества  $S_{\Pi\tau}^-(i)$

в разложении (9.14)

потоки

которых изображают редукцию поверхностного стока, обратны значениям коэффициентов редукции в разложении (9.12)

$$k_s^\omega(t) = \frac{1}{\hat{k}_{\Pi i}^\omega(\tau_\Pi)}, \quad s \in S_{\Pi\tau}^-(i), \tau_\Pi \in \bar{T}_\Pi. \quad (9.15)$$

Ограничения снизу  $\underline{x}_s^\omega(t)$  на потоки  $x_s^\omega(t)$  дуг множеств  $S_b^+(i)$  и  $S_{\Pi\tau}^-(i)$

полагаются равными нулю. В качестве ограничений сверху  $\bar{x}_s^\omega(t)$  принимаются любые достаточно большие числа, удовлетворяющие условиям  $\bar{x}_s^\omega(t) \geq \bar{x}_{i'}^\omega(t)$

для  
я

$s \in S_b^+(i)$  и  $\bar{x}_s^\omega(t) \geq k_s^\omega(t) \bar{x}_{i'}^\omega(t)$  для дуг  $s = S_{\Pi\tau}^-(i)$ .

дуг

$s \in S_b^+(i)$  потоки которых моделируют компенсационное питание

Дуги

МПВ, исходят из дополнительно введенных в модель вершин  $j$ , образующих множес  $J_b(i)$ ,  $s = S_{\Pi\tau}^-(i)$  мо-

нительно введенные вершины  $j \in J_{\Pi\tau}(i)$ , также каждая в «свою». В вершинах  $j \in J_b(i)$  располагаются источники потоков, а в вершинах  $j \in J_{\Pi\tau}(i)$  допол-

ков отрицательной интенсивности). Эти источники и стоки являются неавтоном- делирующие редукцию поверхностного стока из - стоки (источники пото-

ными - значения потоков в них  $b_j^\omega(t)$  зависят от расходов  $x_s^\omega(t) = x_{i'}^\omega(t)$  воды, отбираемой из МПВ, и равны

$$b_j^\omega(t) = \begin{cases} -x_s^\omega(t - \theta_{\Pi\tau}^\omega)\Delta_{\Pi\tau} & \text{для } \theta_{\Pi\tau}^\omega < \tau_{\Pi\tau}, \\ -x_s^\omega(t - \theta_{\Pi\tau}^\omega)[t - \tau_{\Pi\tau}] & \text{для } \theta_{\Pi\tau}^\omega = \tau_{\Pi\tau}, \end{cases} \quad j \in J_{\Pi\tau}(i), \quad (9.16)$$

$$b_j^\omega(t) = \begin{cases} x_s^\omega(t - \theta_{b\tau}^\omega)\Delta_{b\tau} & \text{для } \theta_{b\tau}^\omega < \tau_{b\tau}, \\ x_s^\omega(t - \theta_{b\tau}^\omega)[t - \tau_{b\tau}] & \text{для } \theta_{b\tau}^\omega = \tau_{b\tau}, \end{cases} \quad \theta_{\Pi\tau}^\omega \text{ и } \theta_{b\tau}^\omega \text{ в потоках источников и} \quad (9.17)$$

$b_j^\omega(t)$  Заметим, что величины запаздываний  $x_s^\omega(t)$  согласуются с ко- стоков (при  $j \in J_{\Pi\tau}(i)$ ) дуг.

по отношению к (при  $j \in J_b(i)$ ) вызвавшему их потоку

и заходящих

эффицентами усиления  $\bar{\tau}_{\Pi}$ -му или  $\bar{\tau}_b$ -му исходящих

Если  $s$ -я дуга соответствует временному отрезку в разложении (9.12) и (9.13), то

$$\theta_{\Pi\tau}^\omega = \sum_{\tau=1}^{\bar{\tau}_{\Pi}-1} \theta_\tau^\omega \text{ и } \theta_{b\tau}^\omega = \sum_{\tau=1}^{\bar{\tau}_b-1} \theta_\tau^\omega.$$

$$\theta_{\Pi 1}^\omega = 0, \theta_{\Pi 2}^\omega = \theta_{\Pi 1}^\omega + \Delta_1 = \Delta, \theta_{\Pi 3}^\omega = \theta_{\Pi 2}^\omega + \Delta_2 = \Delta_1 + \Delta_2, \dots, \theta_{\Pi 7}^\omega = \theta_{\Pi 6}^\omega + \Delta_6$$

Например, для дуг, моделирующих редукцию поверхностного стока из вершины / на рис. 9.1 при аппроксимации зависимости коэффициента редукции поверхностного стока от отбора из МПВ в виде кусочно-постоянной функции, показанной на рис. 9.2,

$$= \sum_{\tau_s=1}^6 \Delta_{s\tau}.$$

Кроме запасов складов, соответствующих объемам водных ресурсов в подземных резервуарах  $x_i(t)$ , которые могут принимать различные значения при различных  $\omega$ , в модель МПВ вводятся также ориентиры этих запасов  $X_i(t)$ , которые от  $\omega$  не зависят. Они соответствуют виртуальным ресурсам -

гарантированным значениям объемов водных ресурсов, на которые рассчитывает ВХС при использовании МПВ. Результат функционирования МПВ (его роль в обеспечении пользователей водными ресурсами) зависит как от запасов воды в МПВ, так и от их ориентиров, и оценивается функциями  $j\{X\}j\{f\}, i$ . Значения  $X_i(t)$  принадлежат диапазонам  $\pi_{Qi}$ , выделяемым условиями вида (9.4), с ограничениями снизу  $\underline{X}_i(t)$  и сверху  $\bar{X}_i(t)$ ,

величины которых в основном определяются экологическим благополучием прилегающих территорий.

Уравнения неразрывности (9.2) в  $g$ -й вершине - аналоге створа МПВ при подстановке в него соотношений

$$x_s^{k\omega}(t) = k_s^\omega(t)x_s^\omega(t - \theta_s^\omega) \quad (9.18)$$

между потоками на входах и выходах дуг  $s \in S_b^+(i)$  с коэффициентами усиления

$k_s^\omega$  определяемыми по правилам (9.14), с учетом уравнений неразрывности в

ния

вершинах  $j \in J_b(i)$  с источниками потоков  $b_j^\omega(t)$  значения которых удовлетворяют условиям (9.17), принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_i^\omega(t) = \sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega(t) x_s^{k\omega}(t) - x_i^\omega(t) = \sum_{\tau_b=1}^{\tau_{bt} \wedge \omega} k_{bi}^\omega(\tau_b) x_{i,i'}^\omega(t - \theta_{b\tau}^\omega) \Delta_{b\tau} + \\ + k_{bi}^\omega(\tau_{bt} + 1) x_{i,i'}^\omega(t - \tau_{b\tau}) [t - \tau_{b\tau}] - x_{i,i'}^\omega(t), \end{aligned} \quad (9.19)$$

Уравнения неразрывности (9.2) в вершинах  $j \in J_{\Pi\tau}(i)$ , совместно с уравнениями т.е. они моделирует взаимосвязь (9.8) компенсационного питания с вызвавшим его отбором воды из МПВ.

(9.18), (9.15) и (9.16), описывают редукцию поверхностного стока из  $i$ -й вершины при отборе воды из / -го МПВ в виде

$$\begin{aligned} x_{\Pi i}^\omega(t) = \sum_{s \in S_{\Pi\tau}^+(i)} x_s^\omega(t) = \sum_{s \in S_{\Pi\tau}^+(i)} 1/k_s^\omega(t) x_s^{k\omega}(t) = \sum_{j \in J_{\Pi\tau}(i)} 1/k_{\Pi j}^\omega(t) b_j^\omega(t) = \\ = \sum_{\tau_{\Pi}=1}^{\tau_{\Pi i} \wedge \omega} k_{\Pi\tau}^\omega(\tau_{\Pi}) x_{i,i'}^\omega(t - \theta_{\Pi\tau}^\omega) \Delta_{\Pi\tau} + k_{\Pi\tau}^\omega(\tau_{\Pi i} + 1) x_{i,i'}^\omega(t - \tau_{\Pi\tau}) [t - \tau_{\Pi\tau}], \end{aligned} \quad (9.20)$$

который совпадает с (9.12). Это означает, что гидравлической связи поверхностного стока с МПВ соответствует пучок дуг  $S_{\Pi\tau}^-(i)$

$x_s^\omega(t)$  моделирует редукцию расхода поверхностного с  $\sum_{s \in S_{\Pi\tau}^+(i)} x_s^\omega(t)$  нную отбор дуг  $t - \theta_{\Pi\tau}^\omega$  Поток на входе каждой из этих ром воды из МПВ в моменты времени и их сумма - редукцию поверхностного стока в результате отбора воды из МПВ в течение временного интервала до момента времени  $t$ .

#### 9.4. Имитационная модель

Для анализа подхода к управлению совместным использованием поверхностных и подземных вод, вышеизложенного в данной главе, разработана имитационная модель, воспроизводящая функционирование ВХС в дискретном времени. С её помощью исследуются возможные и выбираются приемлемые распределения динамических потоков в сети  $T(J, S)$ . Для этого сеть  $T(J, S)$  трансформируется в расширенную сеть  $\Gamma(J, S)$ , которая формируется из  $T(J, S)$  повторением её по числу временных сечений - концов отрезков времени, на которые разбит расчетный период. Подсети  $t$ -х временных сечений  $\Gamma_t(J, S)$ , конфигурации которых совпадают с конфигурацией исходной сети  $T(J, S)$ , связаны дугами, моделирующими склады, и дугами с ненулевым запаздыванием в сети  $\Gamma(Y, S)$ . Каждому складу, расположенному в вершине  $T(J, S)$ , в сети  $T(J, S)$  соответствует набор дуг  $\{\Gamma_t\}$ , которые связывают подсети  $T_t(J, S)$  различных временных сечений. Дуги

исходят из вершин  $t$ -х подсетей  $\Gamma_t(J, S)$  и заходят в соответствующие им вершины в  $(t+1)$ -х подсетях  $\Gamma_{t+1}(J, S)$ . Потоки в них моделируют объемы воды в водохранилищах в  $t$ - $Q$  моменты времени; потери воды из водохранилищ учитываются коэффициентами усиления этих дуг  $k_{it}$ . Дугам сети  $\Gamma_t(Y, S)$ , моделирующим элементы ВРС с запаздыванием между моментами изъятия и возврата воды в систему, в сети  $\Gamma_t(J, S)$  соответствуют дуги, исходящие из вершин подсетей  $\Gamma_{t-\tau}(J, S)$ , соответствующих створам изъятия воды, и заходящие в  $\Gamma_{t+\theta}(\bar{J}, \bar{S})$  вершины подсетей

, изображающих створы возврата воды.

Начальные условия на объёмы воды в водохранилищах и запасы подземных вод имитируются потоками

в дугах  $i_0$ , исходящих из подсети  $\Gamma_0(J, S)$ , и заходящих в подсеть  $\Gamma_1(J, S)$ . Начальные условия на расходы водных ресурсов на интервалах первоначального запаздывания пользователей, на участках рек, каналах, редукции поверхностного стока и восполнения  $b_{i, \theta-\tau} = v_{s, \theta-\tau}^0$  подземных вод  $\Gamma_{\theta-\tau}(\bar{J}, \bar{S})$  моделируются в вершинах подсетей соответствующих створам, в которые поступают запаздывающие потоки  $S$ -х дуг, заходящих в  $i$ -е вершины.

Модель реализована в виде комплекса программ. Ядром модели является программный пакет решения линейных сетевых транспортных задач на сети с усилением в дугах (СТЗ). Программный модуль реализует многошаговый процесс решения задачи. На каждом  $t$ -м шаге рассматривается проблема определения потоков в подсети  $\Gamma_t(J, S)$ . Исходные данные, необходимые для её решения, формируются из ограничений задачи В, рассматриваемой в дискретном времени, и результатов определения потоков на предыдущих шагах. На каждом  $t$ -м шаге выполняются следующие функции:

- ввод исходных данных в диалоговом режиме;
- преобразование их к виду, требуемому программным пакетом решения СТЗ;
- вызов программного пакета и решение СТЗ;
- преобразование полученных результатов в соответствии с исходной постановкой задачи.

Поиск допустимых режимов использования поверхностных и подземных вод и выбор из них приемлемых производится в соответствии с проверяемыми правилами управления ВРС в диалоге с ЛПР.

Выбор режимов функционирования ВРС по обобщенным диспетчерским правилам в каждый  $i$ -й момент принятия решений ищется в виде функций, зависящих от состояния системы в этот момент, притока водных ресурсов и потребностей в них на  $t$ -м временном интервале, а также предыстории ВРС на интервалах запаздывания до этого момента. В модели предусмотрена возможность включения функций эффективности использования водных ресурсов элементами ВРС в процесс распределения ресурсов поверхностных и подземных вод во временных интервалах, на которые разбит расчетный период. Линейные функции эффективно-

сти в модель вводятся в виде коэффициентов «стоимостных» зависимостей от величин потоков в дугах. Дуги с выпуклыми кусочно-линейными функциями эффективности в модель вводятся в виде пучка параллельных дуг, каждая из которых моделирует соответствующий участок исходной функции.

В результате проигрывания на модели различных вариантов правил управления получают оценки удовлетворения требований различных водопользователей, в том числе и статистические, а также многолетний режим работы системы, включая режим сработки и восполнения запасов подземных вод. Эти характеристики могут служить основой для выбора рациональной стратегии использования водных ресурсов в данном регионе либо на основе использования различных критериев оптимальности, либо на основе неформальных процедур принятия решений. Использование модели способствует более глубокому пониманию проблемы и развитию методологии управления совместным использованием поверхностных и подземных вод. Она помогает преодолеть противоречие между традиционными подходами к управлению ресурсами поверхностных и подземных вод, предоставляя возможность изучения ситуаций, возникающих в ВХС в результате применения различных правил управления их совместным использованием.

### 9.5. Заключение

Совместное управление поверхностными и подземными водами, образующими единый комплекс природных ресурсов, представляет собой перспективное и недостаточно разработанное направление в проблеме управления водными ресурсами. На сложность описания процессов движения воды в этом комплексе накладывается различие в подходах к управлению ресурсами поверхностных и подземных вод. Проблема обоснования режимов работы ВХС, использующих совместно ресурсы поверхностных и подземных вод, значительно сложнее проблем отдельного управления поверхностными и подземными водами. Особая трудность в решении этой проблемы обусловлена сложной взаимосвязью между поверхностными и подземными водами. Для её исследования целесообразно привлекать математические модели, отражающие основные особенности и условия функционирования ВХС. Предлагаемая в данной работе модель является расширением математической модели оптимального использования поверхностного стока, дополненной фрагментами сети, моделирующими МПВ. Включение фрагментов - аналогов МПВ в модель основывается на описании влияния режимов эксплуатации МПВ на поверхностный сток и на режимы пополнения ресурсов в виде стационарной линейной системы, входом которой служит отбор воды из МПВ, выходами - редуция поверхностного стока и процесс восполнения ресурсов. В модели поверхностные и подземные воды играют роль равноправных взаимодополняющих источников водных ресурсов. Функционирование ВХС рассматривается в условиях неопределённости. В ней, наряду с переменными, соответствующими реальным расходам и объёмам водных ресурсов, присутствуют переменные, моделирующие их ориентиры.

## Глава 10

# ОБОСНОВАНИЕ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

### 10.1. Введение

Рост численности населения, расширение и развитие производства определяют рост отходов, которые поступают в водные объекты, выполняющие канализационные функции. Ухудшается качество природных вод, проявляющееся в изменении их химического состава и деградации экосистем, как водных объектов, так и прилегающих территорий. Основной причиной ухудшения качества природных вод является превышение масс загрязняющих веществ (ЗВ), сбрасываемых в водные объекты, предельных нагрузок, при которых химические и биологические качества водной среды еще соответствуют требованиям! водопользователей и окружающей территории. Ограничение дальнейшего ухудшения качества водной среды, а в перспективе его улучшение, потребовало введения лимитов нагрузок на водные объекты.

Ущерб, наносимый конкретному пользователю отводимыми от него загрязненными водами, не оправдывает затрат на их очистку. Эффект от улучшения качества отводимой воды проявляется у других пользователей и приводит к улучшению экологической обстановки в регионе. От улучшения качества водных ресурсов выигрывает общество в целом. Поэтому назначение индивидуальных величин сбросов ЗВ осуществляется с учетом взаимного влияния элементов ВХС. Определение величин сбросов связано с рассмотрением огромного числа их возможных значений, учетом переноса и трансформации ЗВ и выбором из возможных альтернативных вариантов наилучшего набора. Поэтому неизбежно обращение к математическим моделям, в которых осуществляется выделение оптимального набора значений сбросов ЗВ.

### 10.2. Математическая модель

В данной работе обоснование параметров и режимов функционирования очистных сооружений, а также выбор величин предельно допустимых сбросов в водные объекты (ПДС), осуществляется в оптимизационной модели, отражающей основные особенности качества водных ресурсов функционирующей ВХС. Требования к качеству водных ресурсов в модели основываются на задании предель-

но допустимых концентраций загрязняющих веществ в водоемах, значения которых поэтапно ужесточаются.

В модели учитываются стохастические особенности поступления, перемещения и использования примесей, содержащихся в воде, а также связанные со стохастическим характером функционирования ВХС понятия гарантированного качества водных ресурсов и его надежности, понимаемой как вероятность того, что реализуемое качество не хуже гарантированного. Полученные в модели значения расходов гарантированных масс примесей, отводимых пользователями, соответствуют оптимальным величинам ПДС, а надежности этих расходов - оптимальным надежностям ПДС. Наряду с оптимальными величинами ПДС и их надежностями в решении задачи, которой описывается модель, содержатся оптимальные величины гарантированных расходов и объемов примесей в водных объектах и поступающих пользователям, а также оптимальные значения надежностей этих величин.

В модель наряду с переменными, имитирующими расходы и объемы примесей, присутствующие в воде, вводятся переменные потоков в дугах и запасов в складах, соответствующие их гарантированным значениям. Модель описывается двухэтапной задачей стохастического программирования на сети с преобразованием потоков в дугах. В ней стратегическими переменными первого этапа, выбираемыми при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, выступают гарантированные значения потоков в дугах и запасов в складах сети. Тактическими переменными (второго этапа), выбираемыми при известных реализациях стохастических условий, являются потоки в дугах и запасы в складах сети, которые соответствуют реализуемым массам примесей в водных ресурсах.

В модели ВХС изображается сеть  $F(J,S)$ , начертание которой соответствует схематическому изображению моделируемой системы. Множество вершин  $J$  соответствует не только местам расположения источников, водохранилищ, соединений рек и каналов, изъятия и возврата вод, но и створам контроля качества водных ресурсов. Множество дуг  $S$  изображает пользователей, участки рек и каналов. В вершинах располагаются источники, моделирующие источники примесей, поступающих в водоёмы, и склады, моделирующие водохранилища. Каждый элемент оценивается функцией двух групп переменных, соответствующих гарантирован-

ных и трансформации примесей дан в виде конечного множества  $\Omega$  ным  $Y$  и реализуемым у значениям масс примесей. Случайный процесс поступле-

характерных

реализаций  $\omega$  с их вероятностями  $p^\omega$  Функционирование ВХС рассматривается в дискретном времени, в котором  $[\bar{T}_t, \bar{T}_{t+1}]$  расчетный период  $T=[T_0, T_N]$  точками разбит на  $N$  временных отрезков  $t=0, 1, \dots, N$

длительностью  $h_t$ . Варьируемыми параметрами являются массы примесей. Расходы и объемы водных ресурсов предполагаются заданными.

Участки рек и каналов, а также пользователи, у которых качество поступающих и отводных водных ресурсов образующими множество  $S_t \subset S$  функционально связаны, изображаются дугами, с потоками, соответствующими расходам при-

месей.  $y_{slt}^{k\omega}$  связаны с потоками на их входах  $y_{slt}^{\omega}$  равенствами

$$y_{slt}^{k\omega} = \sum_{\gamma \in L} A_{st}^{\gamma\omega} y_{s\gamma}^{\omega}, \quad s \in S_I, \quad l \in L, \quad A_{st}^{\gamma\omega} \quad (ЮЛ)$$

где:  $L$  - множество учитываемых видов примесей;  $/$  - вид примеси, коэффициенты, характеризующие взаимное влияние примесей. Пользователи, у которых отсутствует функциональная связь между качеством поступающих и отводимых водных ресурсов, изображаются дугами,  $S_{II} \subset S$ . Поток этих дуг  $y_{slt}^{\omega}$  и  $y_{slt}^{k\omega}$  образующими множеством функций эффективности. Поток этих дуг  $y_{slt}^{\omega}$  и  $y_{slt}^{k\omega}$  взаимосвязаны через ниже описываемые функции эффективности.

Водохранилища изображаются складами, располагаемыми в вершинах  $y_{ilt}^{\omega}$  сети. Запасы складов

соответствуют массам примесей в водохранилищах. Их трансформации описывается системами уравнений

$$y_{il,t+1}^{\omega} = \sum A_{it}^{\gamma\omega} y_{i\gamma}^{\omega} + h_t v_{ilt}^{\omega}, \quad i \in I, \quad (10.2)$$

где:  $A_{it}^{\gamma\omega}$  коэффициенты, аналогичные  $A_{st}^{\gamma\omega}$ ;  $v_{ilt}^{\omega}$  поток  $l$ -й примеси, поступающей или выходящей из  $i$ -го склада.

Источники с неуправляемыми расходами примесей изображаются источниками  $b_{ilt}^{\omega} \geq 0$  расходами примесей, располагаемыми в вершинах сети. Источники с управляемыми расходами примесей изображаются в виде фрагментов сети, каждый из которых содержит вершину и две исходящие из нее дуги, которые заходят в вершину, изображающую створ поступления примесей в ВХС. Поток одной из этих дуг соответствует массе примесей, поступающих в ВХС, поток другой - массе примесей, удаленных из сброса. Во введенных вершинах располагаются источники заданной интенсивности моделирующие массы

$$b_{ilt}^{\omega} \geq 0.$$

примесей, подлежащих очистке.

Закон сохранения масс примесей представлен уравнениями неразрывности

$$v_{ilt}^{\omega} = \sum_{s \in S_i^+} y_{slt}^{k\omega} - \sum_{s \in S_i^-} y_{slt}^{\omega} + b_{ilt}^{\omega}, \quad i \in I, l \in L, \quad (10.3)$$

где  $S_i^+$  множество дуг, заходящих в  $i$ -ю вершину;  $S_i^-$  исходящих из нее.

$y_{ilt}^{\omega}$  удовлетворяют начальным условиям

Запасы в складах

$$y_{il0}^{\omega} = y_{il0}^0, \quad i \in I, l \in L, \omega \in \Omega, \quad (10.4)$$

которые соответствуют массам примесей в водохранилищах в начале расчетного периода.

Требования к качеству водных ресурсов задаются следующим образом. Множество видов примесей  $L$  делится на подмножества  $L$  по лимитирующему пока-

зателю,  $\bigcup_{\gamma \in N} L_\gamma = L$ . Примеси множеств  $L_\nu$  образуют  $\nu$ -е дозы загрязнений, удов-

летворяющих неравенствам с

$$\sum_{l \in L_\nu} d_{rlt}^\omega y_{rlt}^\omega \leq \beta_{rt}, \quad r \in R = J \cup S, \nu \in N, \quad (10.5)$$

- величины, обратные предельно допустимым концентрациям, умножен-

ным на заданные расходы воды,  $\beta_{rt}$

где:

- коэффициент неполного перемешивания.

Требования к качеству водных ресурсов, возвращаемых в ВХС, задаются анало-

гично:

$$\sum_{l \in L_\nu} d_{slt}^{k\omega} y_{slt}^{k\omega} \leq \beta_{st}^k, \quad s \in S, \nu \in N \quad (10.6)$$

На величины потоков и запасов накладываются также ограничения снизу

$$y_{rlt}^\omega \geq \underline{y}_{rlt}^\omega, \quad y_{slt}^{k\omega} \geq \underline{y}_{slt}^{k\omega}, \quad r \in R, s \in S, \quad (10.7)$$

которые отражают технологические особенности элементов ВХС. Наряду с пере-

менными  $y_{slt}^\omega$  имитирующими массы примесей, присутствующих в воде, вводятся

переменные потоки в дугах и  $Y_{rlt}$  соответствующие их ориенти-

рам (гарантированным значениям). Переменные  $Y_{rlt}$  в отличие от  $y_{rlt}^\omega$  принима-

ют одни и те же  $\omega \in \Omega$ . Потоки и запасы  $Y_{rlt}$  имитирующие

ориентиры, связаны с другими элементами сети  $F(J, S)$  через целевой функционал.

Они удовлетворяют ограничениям, аналогичным (10.5У-П0.7),

$$\sum D_{rlt} Y_{rlt} \leq \beta_{rt}, \quad \sum D_{slt}^k Y_{slt}^k \leq \beta_{st}^k, \quad Y_{rlt} \geq \underline{Y}_{rlt}, \quad Y_{slt}^k \geq \underline{Y}_{slt}^k. \quad (10.8)$$

Коэффициенты  $D_{rlt}$  и  $D_{slt}^k$

неотрицательны и могут отражать не только требова-

ния, предъявляемые к качеству водных ресурсов, но и особенности планируемых

технологий использования воды.

Эффективность функционирования ВХС обусловлена эффективностью взаи-

модействия ее элементов. Предполагается, что эффекты от использования водных

ресурсов элементами ВХС могут быть сопоставлены в одних и тех же единицах,

для определенности, в рублях. Это дает возможность оценивать функционирова-

ние ВХС критерием, складывающимся из критериев отдельных элементов,

$$f^\omega(\tilde{Y}, \tilde{y}^\omega) = \sum_{r \in R} f_r^\omega(\tilde{Y}_r, \tilde{y}_r^\omega), \quad (10.9)$$

$$\tilde{Y}_r = Y_r, \tilde{y}_r^\omega = \tilde{y}_r^\omega, r \in R \setminus S_{II} \text{ и } \tilde{Y}_r = Y_r, Y_r^k, \tilde{y}_r^\omega = y_r^\omega, y_r^{k\omega}, r \in S_{II}.$$

где

Эффективность ВХС и ее элементов оценивается затратами, включающими

капитальные вложения и эксплуатационные издержки в течение расчетного пе-

риода

$$f_r^\omega(\tilde{Y}_r, \tilde{y}_r^\omega) = \sum_{t \in T} f_{rt}^\omega(\tilde{Y}_{rt}, \tilde{y}_{rt}^\omega). \quad (10.10)$$

Целевой функцией служит математическое ожидание затрат в

$$f(\tilde{Y}, \tilde{y}) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f^\omega(\tilde{Y}, \tilde{y}^\omega) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{r \in R} f_r^\omega(\tilde{Y}_r, \tilde{y}_r^\omega).$$

**(ЮЛ:**

ВХС

Функции, оценивающие затраты, связанные с очисткой сточных вод, выпуклы по каждой из переменных  $Y_{rjt}$  и  $y_{rjt}^\omega$

[Самуэльсон, 1964]. Однако нельзя гарантировать выпуклость  $f_r^\omega(\tilde{Y}_r, \tilde{y}_r^\omega)$

в силу закона убывающей эффективности

по их совокупности. Поэтому задачи нахождения минимума таких функций рассматриваются как многоэкстремальные. Для их решения потребовалось сократить число аргументов функций затрат. Это достигается введением комплексов примесей

$$Z_{rl} = \sum_{l \in L} E_{rlt} Y_{rlt}, z_{rl}^\omega = \sum_{l \in L} e_{rlt}^\omega y_{rlt}^\omega, Z_{st}^k = \sum_{l \in L} E_{slt}^k Y_{slt}^k, z_{st}^{k\omega} = \sum_{l \in L} e_{slt}^{k\omega} y_{slt}^k. \quad (10.12)$$

Коэффициенты  $E_{rlt}$ ,  $E_{rlt}^k$ ,  $e_{rlt}^\omega$  и  $e_{slt}^{k\omega}$  показывают значимость примесей в комплексе.

Введением комплексов примесей функции затрат (10.11) принимают вид

$$F(\tilde{Z}, \tilde{z}) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} F_{rt}^\omega(\tilde{Z}_r, \tilde{z}_r^\omega), \quad (10.13)$$

где аргументы  $\tilde{Z}_r$  и  $\tilde{z}_r^\omega$  имеют смысл, аналогичный

комплексов примесей, определяемых равенствами (10.12), выступает рассмотренный в [Долгоносков, Кочарян, 1998] «эквивалентный сброс загрязняющих веществ для региона».

Определение оптимальных способов очистки загрязняющих веществ осуществляется в результате решения задачи А, описывающей математическую модель определения вектора потоков

сети  $HJ, S$ ), который минимизирует функцию

$F(Z, z)$  на множестве  $G$ , выделяемом системой ограничений (10.1)–(10.8).

В рамках задачи А, описывающей определение оптимальных параметров и режимов очистных сооружений, определяются также оптимальные значения масс ЗВ и их ориентиров в водных объектах. Воспользуемся тем, что концентрации ЗВ в воде, поступающей пользователям из одного и того же участка водоёма (в модели - из одной вершины), и расходы водных ресурсов, поступающих пользователям, заданы. Это дает возможность затраты всех таких пользователей на очистку воды от ЗВ для технологического использования представить в модели в виде функций  $F(Z, z)$ , зависящих от величин потоков, изображающих массы примесей и их ориентиры в дуге, входящей в эту вершину.

Задача А - двухэтапная стохастического программирования. В ней стратегическими переменными первого этапа, выбираемыми при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, выступают гарантированные значения потоков в дугах и запасов в складах  $Y_{rlt}^0$  и  $Y_{slt}^{k0}$ . Оптимальные значения  $Y_{slt}^{k0}$  потоков на выходах дуг соответствуют предельно допустимым массам сбросов загрязняющих веществ (ПДС), которые определяют оптимальные способы их очистки.

Потоки массы примесей на выходах дуг, изображающих участки рек и кана-

лов, оценивают оптимальное гарантированное качество водных ресурсов, поступающих в створ возврата вод. Поток на входах дуг соответствуют оптимальным значениям гарантированных расходов примесей, поступающих вместе с вод- имитируют значения гарантированных оптимальными ресурсами. Запасы объемов примесей в воде водохранилищ. Тактическими  $\omega \in \Omega$ , являются потоки в дугах  $y_{slt}^\omega, y_{slt}^{k\omega}$  и запасы в складах  $y_{ilt}^\omega$  этапа, выбираемыми при конкретных реализациях соответствующие массам примесей в ресурсах. Их оптимальные величины  $y_{slt}^{\omega 0}$  водных соответствуют наилучшим значениям расходов примесей в водных ресурсах, поступающих пользователям, на участки  $y_{slt}^{k\omega 0}$  - отводимых от них в различных рек и каналов, а оптимальные величины  $y_{ilt}^{\omega 0}$  соответствуют массам при стохастических условиях. Оптимальные запасы месей в воде водохранилищ.

В решении  $\tilde{Y}^0, \tilde{y}^0$

задачи А, наряду с оптимальными значениями гарантированного качества водных ресурсов и его показателей при различных исходах стохастических условий, неявным образом содержатся также величины оптимальной надежности гарантированного качества. Надежности качества водных ресурсов, понимаемые как вероятности того, что объемы примесей в течение расчетного периода не превосходят их гарантированных значений, равны

(ЮИ;

$$P_{rl}^0 = \sum_{\{\omega \in \Omega\} \sum_{t \in T} h_t(y_{rlt}^{\omega 0} - Y_{rlt}^0) \leq 0} P^\omega .$$

Заметим, что задание надежностей качества водных ресурсов, отличных от оптимальных  $P^0$ , может привести только к увеличению затрат в ВХС. При  $P < P^0$  затраты возрастают из-за необходимости чаще, чем при  $P^0$ , проводить

дорогостоящие корректирующие мероприятия. При  $P > P^0$  затраты возрастают из-за неполного учета возможностей использования водоохранных мероприятий («перестраховки»).

Задача А состоит в минимизации невыпуклой функции  $F(\tilde{Z}, \tilde{z})$  на выпуклом множестве  $G$ , выделяемом линейными ограничениями (10.1)—(10.12). Общих методов решения таких многоэкстремальных задач нет. Однако специфика задачи А, заключающаяся в бисепарабельности (представимости в виде суммы функций, каждая из которых зависит не более, чем от двух переменных) целевой функции  $F(\tilde{Z}, \tilde{z})$

дает возможность построить метод ее решения с погрешностью, не пре-

$\tilde{Z}^0, \tilde{z}^0$

восходящей заданную. В этом методе нахождение оптимального вектора сводится к решению конечной последовательности оценочных задач выпуклого программирования. Причем на каждом шаге производится оценка близости к оптимуму полученного решения. Этот метод является детализацией схемы ветвей и границ для решения многоэкстремальных задач [Лазебник и др., 1981].

В решении выпуклых оценочных задач, формируемых в процессе решения задачи  $A$ , содержатся также значения оптимальных двойственных переменных,

имеющих смысл оптимальных стоимостных оценок качества водных ресурсов. Поэтому плату за качество водных ресурсов и штрафы за его ухудшение целесообразно назначать, ориентируясь на оптимальные двойственные переменные «последней» оценочной задачи, оптимальный вектор которой является решением задачи **A**.

### **10.3. Математическая модель в обосновании водоохранных мероприятий**

Для решения задачи выбора параметров водоохранного комплекса с различными потоками, соответствующими различным ингредиентам, используется модель обоснования параметров ВХС с однородными потоками, описанная в [Богачева и др., 2000]. Процедура использования этой модели для обоснования параметров водоохранного комплекса с конечным множеством примесей предполагает решение совокупности задач для каждой примеси отдельно. Выделяется задача с наибольшим оптимальным значением целевой функции. Значение этой функции дает оценку снизу оптимального значения исходной задачи. Оптимальные потоки, полученные в этой задаче, формируют ограничения снизу для решения задач с остальными примесями. Затем с остальными задачами поступают так же. За конечное число шагов процесс сходится. Полученное на последнем шаге значение целевой функции дает оценку сверху оптимального значения затрат, связанных с проведением водоохранных мероприятий.

Для использования предложенной модели и описанной процедуры, разработан пакет программ на основе системы управления базой данных (СУБД) MS Access, поддерживающий систему сбора, обработки и анализа информации о ВХС. СУБД состоит из таблиц реляционной базы данных для хранения данных и связей между ними, SQL-запросов к этим таблицам, форм доступа к управлению запросами и макрокомандами, организующими сбор и обработку первичной информации, а также последующие математические расчеты на основе этих данных (рис. 10.1).

СУБД содержит электронные формы, оснащенные элементами управления, с помощью которых организованы сбор и структуризация первичной информации о ВХС, а также управление процессом расчетов, сохранение и анализ полученных результатов.

Форма «Система» (рис. 10.2) аккумулирует информацию о параметрах элементов сети, включающих мощности источников примесей, законы их преобразования в дугах, требования к качеству водных ресурсов и производственные функции.

Для формы «Система» вспомогательными формами являются «Исход», «Технология», «Примесь», «Период», описывающие соответственно реализации стохастических условий, технологии очистки от загрязняющих веществ, виды загрязняющих веществ и временные интервалы функционирования ВРС. Также вспомогательными являются формы «Вершины» и «Дуги», в которых осуществляется основной контроль вводимых исходных данных.

Рис. 10.2. Форма: Система

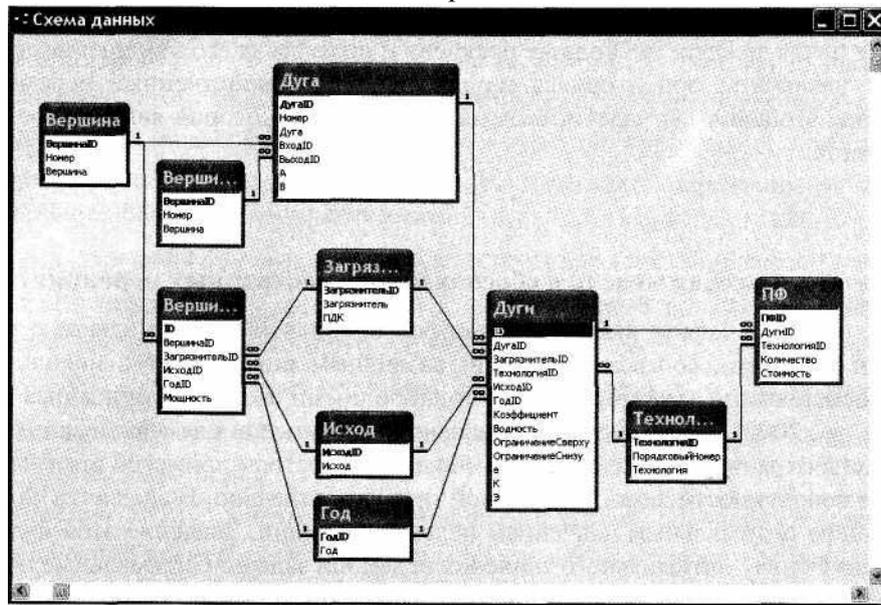


Рис. 10.1. Схема данных СУБД

Форма «Сеть (ВХС)» (рис. 10.3) задает и упорядочивает набор вершин и дуг, соединяющих эти вершины. Для формы «Сеть (ВХС)» созданы вспомогательные формы: «Дуга» (рис. 10.4) и «Вершина» (рис. 10.5), осуществляющие преобразования отдельных элементов сети. Дуги и вершины можно добавлять, корректировать и аннулировать.

Сеть : форма

Сеть (ВРС)

Вершины		Дуги			
Номер	Вершина	Номер	Дуга	Вход	Выход
1	Ельцы	1	1-4	Ельцы	Ржев
2	Медное	2	2-6	Медное	Тверь
3	Прутинка	3	3-2	Прутинка	Медное
4	Ржев	4	4-5	Ржев	Старца
5	Старца	5	5-6	Старца	Тверь
6	Тверь	6	6-30	Тверь	Иваньковское водохрани-
7	МПКХ "Спирово"	7	7-1	МПКХ "Спирово"	Ельцы
8	МПКХ "Селожарово"	8	8-1	МПКХ "Селожарово"	Ельцы
9	МПКХ г. Лихославль	9	9-2	МПКХ г. Лихославль	Медное
10	Тверская Птицефабрика	10	10-2	Тверская Птицефабрика	Медное

Выход

Рис. 10.3. Форма: Сеть

Дуга : форма

Название: 1-4  
Номер: 1

Вход: Ельцы      Выход: Ржев

A: 5  
B: 0,8

Ok      Отмена

Рис. 10.4. Форма: Дуга

Вершина : форма

Название: Ельцы  
Номер: 1

Ok      Отмена

Рис. 10.5. Форма: Вершина

Разработана программа формирования производственных функций, зависящих от двух групп переменных, соответствующих оптимальным режимам функционирования очистных сооружений и отклонениям от них. Управление этой программой осуществляется с помощью элементов управления формы, представленной на рис. 10.6.

С использованием представленной модели отражена проблема выбора водохранных мероприятий Верхневолжской водно-ресурсной системы, сеть которой представлена на рис. 10.7.

Рис. 10.6. Построение производственной функции

Дуги : форма

Дуга: 1-4 - Принес: БЖК - Гарантия: 0 - Исход: Маловодный - Период: 2005 -

Коэффициент преобразования: 0,8  
 ПДК: 50  
 Водность: 6  
 Ограничение потока сверху: 300  
 Ограничение потока снизу:

Альфа: 5  
 Бета: 0,8  
 I: 1

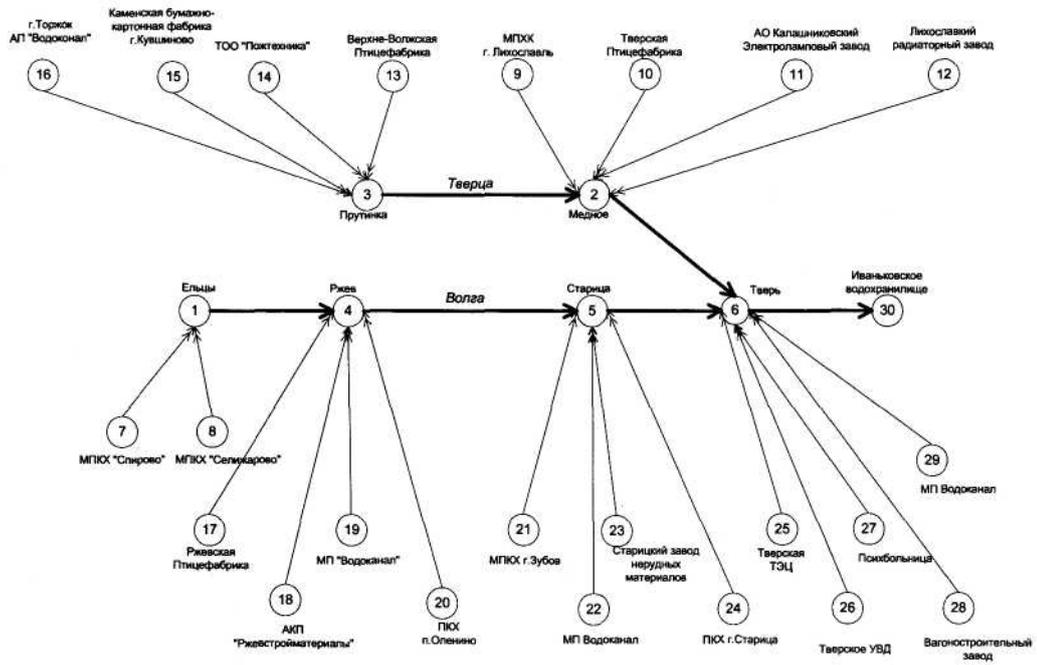
Производственная функция

Технология	Номер	Количество	Расчет	Стоимость
V	6	1800	209823,95	209823,95
IV	5	1200	33584,9359	33584,9359
III	4	800	5386,69375	5386,69375
II	3	500	874,975	874,975
I	2	200	153,1	153,1
0	1	100	37,6	37,6

Капитальные затраты: 120  
 Эксплуатационные затраты: 22  
 Дисконтирующий коэффициент: 0,13  
 Приведенные затраты:

Принять расчет ПВ  
 Ок Отмена

Рис. 10.7. Сеть Верхневолжской ВХС



## 10.4. Подход к формированию рынка разрешений на сброс загрязняющих веществ в водоёмы

### 10.4.1. Проблема

ПДС назначаются пользователям на определенный срок, например, на 5-10 лет, в течение которого, как правило, меняется водохозяйственная обстановка. Появляются новые предприятия - пользователи водных ресурсов - и закрываются ранее функционировавшие. Развивается производство, меняются технологии использования водных ресурсов и очистки сточных вод. Возникает проблема перераспределения разрешений на сброс ЗВ. Решение этой проблемы видится в создании рынка разрешений, участники которого обладают правом самостоятельно выбирать предпочтительные варианты своего поведения. Они могут либо обеспечить не превышение ПДС изменением технологии использования водных ресурсов, строительством и реконструкцией очистных сооружений, либо приобрести право на сброс у других пользователей, которым выгодно такое право продать. При этом не могут быть превышены допустимые уровни загрязнения водоемов.

Специфика рынка разрешений на сброс ЗВ порождается особенностями использования водных ресурсов и управления их качеством. Качество воды в водоёмах формируется под влиянием источников ЗВ пространственно распределенной системы - ВХС, элементы которой связаны сетью с потоками в ней воды и примесей. В очистных сооружениях чистятся индивидуально подобранные комплексы ЗВ с функционально взаимосвязанными степенями очистки различных примесей. Эти комплексы продаются. В силу индивидуальности комплексов и состава ЗВ, подлежащих очистке, а также из-за влияния сети, покупатель может использовать их лишь частично. На функционирование рынка накладываются отпечаток стохастические условия формирования качества вод, обусловленные вероятностной природой основного водного ресурса - речного стока - и потребностями некоторых пользователей.

Подходы к формированию разрешений (квот) на сброс ЗВ в водоемы в основном заимствованы из развитых идей и методов рынка выбросов в воздушную среду. Их обзор содержится в [Кречетов, 1991а, б]. Выделяются бабл-принцип (принцип пузыря) и определение масс перераспределяемых сбросов, минимизирующих суммарные затраты пользователей. Бабл-принцип рассматривает все предприятия, сбрасывающие ЗВ в водоемы, как единый комплексный источник загрязнения. Эти предприятия могут обмениваться квотами на сброс так, чтобы масса сбросов этого комплексного источника не превышала разрешенного суммарного сброса предприятий [Dowd, 1984]. Определение масс перераспределенных сбросов производится также с использованием математической модели, в которой учитываются коэффициенты влияния сбросов источников, расположенных вдоль реки, на качество воды в контрольных створах. В этой модели ЗВ представлены одной примесью [O'Neil et al..., 1983].

Данная работа посвящена формированию рынка сбросов ЗВ в водоемы, в котором вначале назначаются ПДС, играющих роль разрешений на сбросы, с после-



$$\delta_{sl}^{k\omega} = \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma\omega} \delta_{sl}^{\omega}. \quad (10.17)$$

Требования к качеству водных ресурсов порождают диапазоны допустимых значений потоков в дугах сети. Множество видов примесей  $L$  делится по лимитирующим показателям (например, санитарно-токсикологические, общесанитарные, органолептические  $L_\gamma$ , которые могут иметь непустое пересечение, их объединение  $\cup L_\gamma = L$ , ие ЗВ и др.) на  $L_\gamma$  подмножества образуют  $y$ -е дозы

Примеси множеств загрязнения, величины которых не должны превышать единицы [Указания..., 1971]. Это означает, что потоки на входах дуг должны удовлетворять неравенствам

$$\sum_{l \in L_v} d_{sl} y_{sl}^{\omega} = \sum_{l \in L_v} d_{sl} [y_{sl}^{\omega 0} + \delta_{sl}^{\omega}] \leq x_s^{\omega}, \quad (10.18)$$

где  $d_{sl}$  - объем

величина, обратная предельно допустимой концентрации,

$x_s^{\omega}$  водных ресурсов в водоеме, его значения фиксированные. Требования к качеству воды, возвращаемой в ВХС, которым должны удовлетворять потоки на выходе дуг, задаются такими же неравенствами

$$\sum_{l \in L_v} d_{sl} y_{sl}^{k\omega} = \sum_{l \in L_v} d_{sl} [y_{sl}^{k\omega 0} + \delta_{sl}^{k\omega}] \leq x_s^{k\omega}. \quad (10.19)$$

Пользователи с очистными сооружениями образуют множество  $H$  и изображаются в виде источников, потоки  $m_h^{\omega} = \{m_{hl}^{\omega} \mid l \in L\}$  соответствуют массам  $m_h^{\omega} = m_h^{\omega 0} + \Delta_h^{\omega}$ ,  $h \in H$ , где  $m_h^{\omega 0}$  - начальные потоки,  $\Delta_h^{\omega} = \{\Delta_{hl}^{\omega} \mid l \in L\}$  которых сам ЗВ, поступающих в ВХС. Значения отклонения от них, которые могут варьироваться в зависимости от глубины очистки.  $m_{hl}^{\omega}$  ограничены Величины потоков  $m_{hl}^{\omega}$  сверху максимально возможной величиной сбросов снизу - нулем в силу отрицательности значений масс примесей

$$0 \leq m_{hl}^{\omega} = m_{hl}^{\omega 0} + \Delta_{hl}^{\omega} \leq \bar{m}_{hl}^{\omega}. \quad (10.20)$$

Исходные значения ПДС  $M_h^0 = \{M_{hl}^0 \mid l \in L\}$  в процессе обмена на формируемом рынке сбросов  $M_h = M_h^0 + q_h$ , где итоги купли и продажи преобразуются в  $q_h = \{q_{hl} \mid l \in L\}$  которые могут быть как квот

$$q_h = \{q_{hl} \mid l \in L\}$$

тельными.

Значения  $M_{hl}$  ограничены сверху величиной  $\bar{M}_{hl} = \max_{\omega \in \Omega} \bar{m}_{hl}^{\omega}$ , так как нет смысла назначать ПДС больше наибольшего возможного значения сброса, определяемого технологией использования водных ресурсов

$$(10.21)$$

$$0 \leq M_{hl} = M_{hl}^0 + q_h \leq \overline{M}_{hl}.$$

Состав примесей  $m_{hl}^\omega$  в сбросах пользователей  $m_h^\omega$  и их ПДС для каждого пользователя индивидуален. Он характеризуется коэффициентами  $\alpha_{hl}$ , которые показывают долю  $l$ -й примеси в массе сброса  $h$ -го пользователя

$$m_{hl}^\omega = \alpha_{hl} |m_h^\omega|, M_{hl} = \alpha_{hl} |M_h|, \quad (10.22)$$

где  $|m_h^\omega| = \sum_{l \in L} m_{hl}^\omega$ ,  $|M_h| = \sum_{l \in L} M_{hl}$ .

Так как в сбросах разных пользователей содержатся различные составы примесей, то  $h$ -й пользователь, купивший разрешение (квоту) на сброс  $q_h^n$  у  $n$ -го

пользователя, может воспользоваться им частично. Возможная для использования доля купленного разрешения определяется наименьшим соотношением примесей в составе сбросов продавца и покупателя

$$\varepsilon_n^h = \min_{l \in L} \frac{\alpha_{hl}}{\alpha_{nl}}. \quad (10.23)$$

Коэффициенты  $\varepsilon_n^h$  преобразования приобретённых разрешений на сброс ЗВ в увеличение ПДС образуют квадратную матрицу коэффициентов приращения квот. Её размерность соответствует числу пользователей с очистными сооружениями.

Приобретаемые приращения на сброс ЗВ образуют сумму

$$q_h^+ = \sum_{n \in H} \varepsilon_n^h q_n^{h+} \quad (10.24)$$

продаваемые -

$$q_h^- = \sum_{n \in H} q_n^{h-}. \quad (10.25)$$

Приращения разрешений на сброс ЗВ пользователей формируются из продаваемых и приобретаемых квот в виде

$$q_h = q_h^+ - q_h^-. \quad (10.26)$$

Закон сохранения масс примесей представлен системой уравнений неразрывности потоков в вершинах сети

$$\sum_{s \in S_i^+} y_{sl}^{k\omega} - \sum_{s \in S_i^-} y_{sl}^\omega + \sum_{h \in H_i} m_{hl}^\omega + b_{il}^\omega = 0, \quad (10.27)$$

где  $S_i^+$  множество дуг, исходящих из нее;  $S_i^-$  множество дуг, заходящих в  $i$ -ю вершину,

$b_{il}^\omega$  поток  $l$ -го вида, поступающий в  $i$ -ю вершину,  $D$  - множество источников, потоки которых изображают ЗВ, отводимые пользователями с очистными сооружениями в  $z$ -ю вершину. В терминах начального распределения система (10.27) при подстановке уравнений (10.15) принимает вид

$$\sum_{s \in S_i^+} (y_{sl}^{k\omega^0} + \delta_{sl}^{k\omega}) - \sum_{s \in S_i^-} (y_{sl}^{\omega^0} + \delta_{sl}^\omega) + b_{il}^\omega + \sum_{h \in H_i} (m_{hl}^{\omega^0} + \Delta_{hl}^\omega) = 0. \quad (10.28)$$

Система уравнений (10.28), соответствующая закону сохранения масс примесей, при начальном распределении ЗВ в водных объектах, при которых

$$\Delta_{hl}^{\omega} \text{ равны нулю, преобразуется в систему}$$

$$\sum_{s \in S_i^+} y_{sl}^{k\omega 0} - \sum_{s \in S_i^+} y_{sl}^{\omega 0} + \sum_{h \in H_i} m_{hl}^{\omega 0} + b_{il} = 0. \quad (10.29)$$

Системы уравнений (10.28) и (10.29) совместно порождают условия, которым должны удовлетворять вариации потоков, изображающих в сети  $T(J,S)$  приращение масс примесей при изменениях масс сбросов ЗВ в водные объекты

$$\sum_{s \in S_i^+} \delta_{sl}^{k\omega} - \sum_{s \in S_i^+} \delta_{sl}^{\omega} + \sum_{h \in H_i} \Delta_{hl}^{\omega} = 0. \quad (10.30)$$

#### 10.4.3. Целевые функции и их трансформации

Затраты на очистку стоков от содержащихся в них примесей зависят как от технологий очистки, торым в модели соответствуют ориентированных на  $M_h$  достижение ПДС, ко-

Функции  $f_h(M_h, m_h^{\omega})$  так и от режимов работы очистных сооружений  $M_h$  и  $m_h^{\omega}$  в силу

выпуклы по каждому из переменных закона об убывающей эффективности, в соответствии с которым с ростом степени очистки стоков растут затраты на их доочистку [Самуэльсон, 1964]. В общем случае нельзя гарантировать выпуклость по их совокупности. Однако производственные функции очистных сооружений всех пользователей Верхневолжской ВХС, построенные К.И. Софроновой, оказались  $M_h$  и  $m_h^{\omega}$  выпуклыми по совокупности пе-

ременных  $f_h(M_h, m_h^{\omega})$  [Глухих и др., 2006]. В данном разделе предполагается, что функции такими свойствами обладают.

Вид зависимостей производственных функций очистных сооружений иллюстрирует рис. 10.8, на котором показано параметрическое представление функции

$f_h(M_h, m_h^{\omega})$  в виде семейства функций одного переменного  $m_h^{\omega}$ , двух переменных  $M_h$ . На рис. 10.8 он принимает дискретные значе-

которым соответствуют кривые 1,2,... Кривая 0 - нижняя огибающая  $M_{h1}, M_{h2},$

$f_h(M_{hi}, m_h^{\omega}), i=1,2,\dots$

описывает работу очистных сооружений в оптимальном режиме, в котором  $m_h^{\omega} = M_h$ . Во всех остальных случаях ( $m_h^{\omega} \neq M_h$ ) затраты больше (кривые  $f_h(M_{hi}, m_h^{\omega})$  на рис. 10.8 выше кривой 0).

Выше не только возрастающие при  $m_h^{\omega} > M_h$  ветви кривых 1,2,..., которые показывают суммарный рост затрат на очистку стоков и штрафов за превышение ПДС, но и ветви этих кривых, показывающие уменьшение затрат на очистку при увеличении сбросов из-за снижения степени очистки. Для одного и того же значения

$|m_h^\omega - M_h|$  при  $m_h^\omega < M_h$  отличие от кривой 0 больше, чем при  $m_h^\omega > M_h$ , что соответствует большим значениям на доочистку, как правило, значительно большим, чем выигрыш от уменьшения степени очистки.

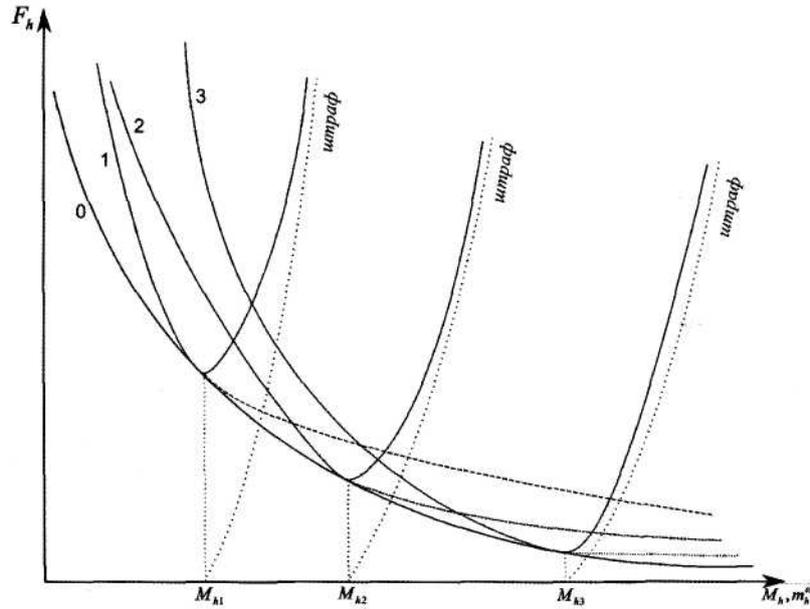


Рис. 10.8. Зависимость затрат на очистку сточных вод от масс сбрасываемых примесей

Затраты  $F_h(M, m_h^\omega)$

$f_h^\omega(M_h, m_h^\omega)$  пользователей, связанные с функционированием очистных сооружений, включающих затраты от ЗВ, штрафы  $\varepsilon_h(M_h, m_h^\omega)$  за превышение величин сбросов значений ПДС

на рынке квот на сброс ЗВ в целевые

разрешений на сброс ЗВ и выигрыш

$$F_h(M_h, m_h^\omega) = f(M_h, m_h^\omega) + \varepsilon_h(M_h, m_h^\omega) \quad (10.31)$$

включаются также затраты

При совершении сделок купли-продажи на приобретение разрешений на сброс ЗВ и выигрыш

$$C_h^+ = \sum_{h \in H} c_n^h q_n^{h+} \text{ на приобретение разрешений на сброс ЗВ и выигрыш}$$

$$C_h^- = \sum_{n \in H} c_n^h q_n^{h-} \text{ функции пользователей}$$

от продажи части квот

$$F_h(M_h, m_h^\omega) = f(M_h^0 + q_h, m_h^{\omega 0} + \Delta_h^\omega) + \varepsilon_h(M_h^0 + q_h, m_h^{\omega 0} + \Delta_h^\omega) + C_h^+ - C_h^- \quad (10.32)$$

$c_n^n$  и  $c_n^h$  -

Здесь

ЗВ. Формулой (10.32) описывается трансформация целевых функций пользователей водных ресурсов, которые могут совершать сделки с несколькими участниками рынка и выступать одновременно и как продавцы, и как покупатели квот на сброс ЗВ.

Приращения значений функций  $F_h(M, m_h) = M \cdot F_h(M, m_h^{\omega})$ , где  $M^{\omega}$  - символ математического ожидания,

$$\Delta F_h(M, m_h) = F_h(\Delta F_h(M_h, m_h^{\omega}), m_h^0) \quad (10.33)$$

при совершении актов купли-продажи отрицательные. В противном случае обмен разрешениями сброс ЗВ не производится.

Вид функций иллюстрирует рис. 10.9, на котором трансформация функции  $F_h(M_h, m_h^{\omega})$  показана ден вид преобразования продавца ( $C_h - 0$ ) и этих рисунках, затраты, связанные со штрафами - строго возрастающие функций  $(C_h^+ = 0)$ .

рис. 10.10, где приведены функции  $F_h(M_h, m_h^{\omega})$  покупателя. Как видно на с ростом сбросов свыше ПДС функции  $\varepsilon_h(M_h, m_h^{\omega})$

При  $m_h^{\omega} = M_h$

Причем их рост значительно

превышает снижение затрат на очистку стоков при

$$\varepsilon_h(M_h, m_h^{\omega}) \quad m_h^{\omega} > M_h$$

функции равны нулю. Указанная особенность штрафных санкций заставляет пользователей избегать превышения ПДС. Вид зависимостей затрат  $F_h(M_h, m_h^{\omega})$  на очистку стоков от ЗВ, приведенных на рис. 10.9, показывает, что продавец выигрывает за счёт уменьшения сбросов. Это случается при переходе к более прогрессивным технологиям использования водных ресурсов и очистки

сточных вод. Типичный вид трансформации функций  $F_h(M_h, m_h^{\omega})$  покупателя, показанный на рис. 10.10, демонстрирует его выигрыш за счёт увеличения сбросов (уменьшения степени очистки), что, как правило, происходит при использовании устаревших технологий.

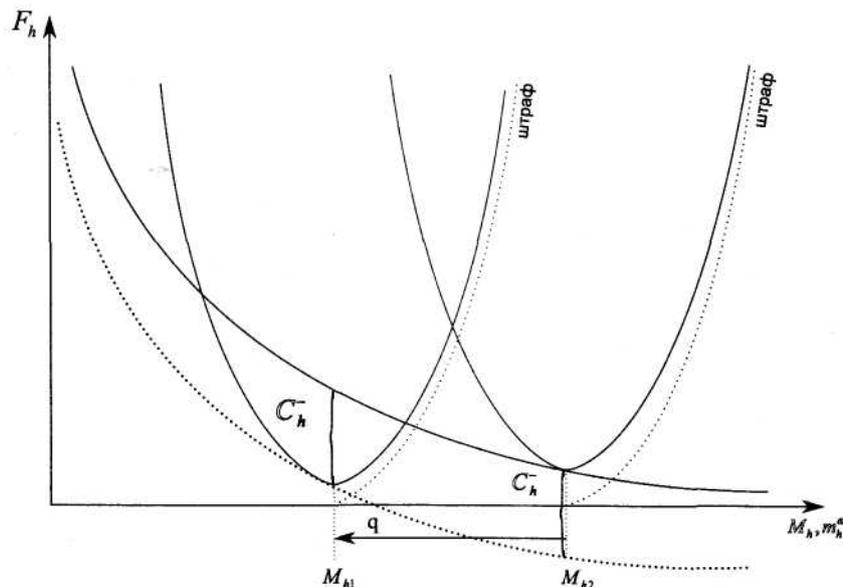


Рис. 10.9. Трансформация целевой функции продавца

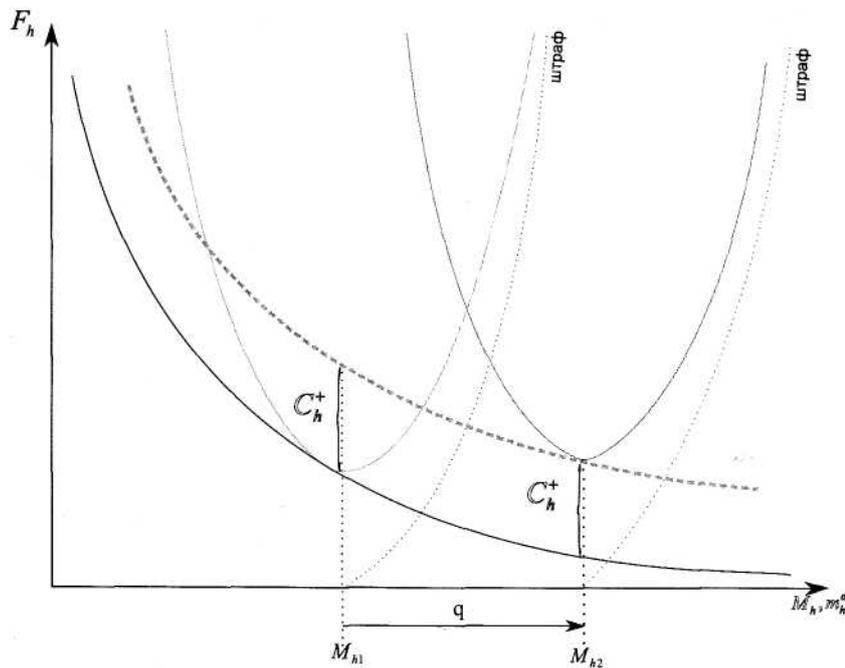


Рис. 10.10. Трансформация целевой функции покупателя

#### 10.4.4. Функционирование рынка

Продавцы и покупатели договариваются друг с другом о ценах, по которым приобретаются разрешения на сброс ЗВ, и их объемах. При этом могут быть нарушены требования (10.16) и (10.17), предъявляемые к качеству водных ресурсов в водных объектах. Для того, чтобы избежать превышения массами сбрасываемых ЗВ допустимых пределов их содержания в водных объектах, необходимо ввести ограничения на объемы сбросов. Для организации такой процедуры существует управляющий орган ВХС (центр), который заинтересован в экологическом благополучии водоёмов, а также в том, чтобы по возможности были удовлетворены запросы участников рынка. Его интерес выражается, в частности, в наибольших отчислениях участников сделок в фонд, предназначенный для обеспечения эффективного функционирования ВХС

$$\varphi(q) = \sum_{h \in H} [\mu_h^+ q_h^+ - \mu_h^- q_h^-], \quad (10.34)$$

$\mu_h^+$  и  $\mu_h^-$  — тарифы  $\mu_h^+$

где

$\mu_h^-$  — величина отрицательная, то второе слагаемое в скобках  $> 0$ ,  $\mu_h^+ > 0$  (так как  $q_h^-$  формулы (10.34) принимает положительные значения). Отчисляют и продавцы, и покупатели.

Центр решает задачу В максимизации поступлений средств от совершаемых сделок, описываемых определённой (10.34) функцией

$$\varphi(q)$$

ляемом требованиями, предъявляемыми к качеству водных ресурсов в водных объектах (10.18) и (10.19), ограничениями (10.20) и (10.21), накладываемыми на приращения ПДС и сбросов ЗВ, правилами преобразования приращений масс примесей в водотоках, описываемые уравнениями (10.17), и уравнениями баланса приращений масс ЗВ в вершинах сети  $T(J,S)$ , соответствующих створам водохозяйственной сети. В результате решения задачи В определяются величины при-

$$\Delta_h^\omega,$$

формирующие новые значения

ращений разрешений на сброс  $q$  и сбросов

$$m_h^\omega$$

ПДС  $M_h$  и новые значения сбросов  $m_h^\omega$  которые назначаются пользователям водных ресурсов. В силу свойства (10.33) целевых функций математическое ожидание затрат на очистку стоков от ЗВ всех пользователей ВХС в результате за-

$$F_h(M, m_h)$$

ключённых актов купли-продажи меньше его исходного значения

$$F_h(M^0, m_h^0).$$

Переход от начального распределения квот  $M_h^0$  на сброс ЗВ к новым значениям  $M_h$  влечёт изменение наборов величин сбросов  $m_h^\omega$  Кроме того, у покупателей

$$q_h^n$$

телей разрешений могут появиться части покупок неиспользуемые в связи с несопадением состава их сбросов с составом сбросов продавцов, продавших им свои квоты. Появляется возможность с выгодой избавиться от излишков разрешений на сброс ЗВ и найдутся покупатели этих излишков. В этом

$$M_h \text{ и } m_h^\omega \text{ случае новые зна-}$$

чения играют роль исходного распределения разрешений и сбросов ЗВ для совершения следующего шага сделок купли-продажи квот. Подобная ситуация воспроизводится и далее, образуя итерационный процесс последовательного преобразования квот и сбросов ЗВ. На каждом шаге этого процесса

$$F_h(M, m_h)$$

целевых функций описывающих затраты, связанных с очисткой стоков, убывают. Так как затраты не могут быть отрицательными, значения функций

$$F_h(M, m_h)$$

ограничены снизу. Убывающая ограниченная снизу последовательность имеет предел. Поэтому описанный итерационный процесс рыночного обмена разрешениями на сброс ЗВ сходится.

## 10.5. Заключение

Приведено обоснование параметров и режимов функционирования очистных сооружений, а также выбор величин ПДС, воплощённое в оптимизационной модели, в которой учитываются стохастические особенности поступления, перемещения и использования примесей, содержащихся в воде, а также связанные со стохастическим характером функционирования ВХС понятия гарантированного качества водных ресурсов и его надёжности. Для нахождения оптимальных параметров и показателей водоохранного комплекса ВХС, в водоёмах которой присут-

ствуется конечное множество примесей, разработана процедура, использующая решение совокупности задач для каждой примеси отдельно. Для использования предложенной модели и описанной процедуры разработан пакет программ на основе системы управления базой данных (СУБД), поддерживающий систему сбора, обработки и анализа информации о ВХС.

Предложен подход к формированию рынка разрешений на сброс ЗВ в водоёмы, в котором учитываются особенности использования водных ресурсов и управления их качеством в рамках пространственно распределенной системы - ВХС, элементы которой связаны сетью с потоками в ней воды и примесей. Рынок функционирует в стохастических условиях формирования качества вод.

При сопоставлении дополняющих друг друга рынка водных ресурсов, описанного в главе 6 применительно к согласованию стратегий управления трансграничными водными объектами, и рынка разрешений на сброс ЗВ в водоёмы, представленного в данной главе, обнаруживается их методологическая дополнительность. На рынке водных ресурсов покупаются и продаются объёмы водных ресурсов, ориентиры под них «подстраиваются». На рынке разрешений на сброс ЗВ в водоёмы «ведущими» выступают ориентиры масс примесей, реализуемые массы сбросов являются «ведомыми».

## Список литературы

- Авакян А.Б., Лебедева И.П.* Водохранилища XX века как глобальное географическое явление // Изв. РАН. Сер. геогр. № 3. 2002. С. 13-20.
- Агасандян Г.А., Гасанов И.И., Ерешко Ф.И.* Новые подходы в проблеме комплексного управления водными ресурсами. М.: ВЦ РАН, 2003. 54 с.
- Албегов М.М., Волконский В.А., Гофман К.Г.* Оптимизационный реализм или экономический нигилизм? // Экономика и математические методы. Т.23. Вып. 3. 1987.
- Африка: экологический кризис и проблемы выживания. М.: Институт Африки РАН, 2001. 255 с.
- Барабанова Е.А.* Сопоставление водохранилищ по комплексу их позитивных и негативных воздействий на окружающую среду и хозяйство // Известия РАН. Серия географическая. № 2. 2004. С.72-82.
- Боратов Р.Ж.* Новые измерительные датчики для орошения // Мелиорация и экономика сельского хозяйства. № 7. 2004. С. 11-12.
- Беллман Р.* Динамическое программирование. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 400 с.
- Бобылев С.И.* Воздействие изменения климата на сельское хозяйство и водные ресурсы России // Климатические изменения: взгляд из России / Под ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: Теис, 2003. 416 с.
- Богачева Н.Ю., Хранович И.Л., Чэнь Ци* Обоснование стратегий рационального использования водных ресурсов в условиях риска // Инженерная экология, №6.2000. С.2-21.
- Бончковский Н.Ф., Кузин А.К.* К вопросу совершенствования Правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами // Водные ресурсы, № 3. 1986. С. 22-30.
- Бурков В.Н., Гувески В.К., Нанева Т.Е., Опойцев В.К., Попчев И.П., Цветанов И.П.* Распределение водных ресурсов // Автоматика и телемеханика. № 1. 1980. С.81-90.
- Бурков В.К., Кудинов А.Г., Хранович И.Л.* Водохозяйственная система как активная система // Водные ресурсы, № 4. 1990. С.90-96
- Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Как управлять проектами. М.: СИНТЕГ-ГЕО, 1997. 188 с.
- Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. М: Наука, 1977. 255 с.
- Бурков В.Н., Кондратьев В.В.* Механизмы функционирования организационных систем. М.: Наука, 1981. 383 с.

- Бурков В.Н., Лернер А.Я.* Принцип открытого управления активными системами. М.: Ин-т проблем управления, 1971. 26 с.
- Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем. Состояние и перспективы. М.: Синтез, 1999. 126 с.
- Вавилин В.А., Циткин М.Ю.* Математическое моделирование управления качеством водной среды // Водные ресурсы. № 5. 1977. С. 114-132.
- Вайцеккер Э., Ловинс Э.Б., Ловинс Л.Х.* Фактор четыре. М.: Academia, 2000. 400 с.
- Ватель И.А., Ерешко Ф.И.* Математика конфликта и сотрудничества. М.: Знание, 1973. 64 с.
- Великанов А.Л., Клёнов В.И., Минкин Е.Л.* Совместное использование поверхностных и подземных вод в Московском регионе при современных экологических требованиях // Водные ресурсы. Т.21. № 6. 1994. С.711-714.
- Галямин Е.П.* Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов в орошении. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 272 с.
- Гермейер Ю.Б.* Игры с противоположными интересами. М.: Наука, 1976. 327 с.
- Гермейер Ю.Б., Мусеев Н.Н.* Информационная теория иерархических систем управления // Проблемы прикладной математики и механики. М.: Наука, 1974. С.30<sup>^</sup>3.
- Глобальная экологическая перспектива 3. М.: ИнтерДиалект, 2002. 504 с.
- Глухих М.В., Желонкин С.В., Кочарян А.Г., Лебедева И.П., Софронова К.И., Хранович И.Л.* Обоснование водоохранных мероприятий в стохастических условиях с использованием математических моделей // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда, секция 4 «Экологическое состояние водных объектов, качество вод и научные основы их охраны», часть 2. М: Росгидромет, 2006. С.221-226.
- Глухих М.В., Иванов Г.А., Хранович И.Л.* Математическая модель выбора водоохранных мероприятий в условиях риска // Материалы II Всероссийской конференции «Проблемы информатизации регионального управления». Нальчик: КБНЦ РАН, 2006. С.109-112.
- Горшков В.Г.* Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995. 472 с.
- Готовцев А.В.* Концептуальное описание модели водоохранных мероприятий в бассейне Волги (ВОЛГА-29) в условиях неполной и неточной информации // Государственный университет управления. Вестник Университета. Серия «Информационные системы управления». Выпуск 2 (3). М.: 2001. С. 17-37
- Гофман К.Г.* Экономическая оценка природных ресурсов в условиях социалистической экономики. М.: Наука, 1977.
- Данилов-Данильян В.И., Рыбкин А.А.* Основные принципы оптимизационного подхода и возможности его реализации // Системные исследования. Ежегодник 1983. М.: Наука, 1983.
- Данилов-Данильян В.И.* Бегство к рынку: десять лет спустя. М.: Изд-во МНЭПУ, 2001. 232 с.

- Данишов-Данильян В.И.* Экологическое значение энергосбережения // Энергетика России: проблемы и перспективы. Труды Научной сессии РАН. М.: Наука. 2006. С.287-296.
- Данишов-Данильян В.И.* Вода - стратегический фактор развития экономики России // Вестник РАН. Т. 77. № 2. 2007. С. 108-114.
- Данилов-Данжъян В.И.* Водные ресурсы - стратегический фактор долгосрочного развития экономики России (С кафедры Президиума РАН) // Вестник РАН. Т. 79, № 9. 2009. С.789-796.
- Данилов-Данильян В.И.* Дефицит пресной воды и мировой рынок // Водные ресурсы. Т. 32. № 5. 2005. С. 625-633.
- Данилов-Данильян В.И., Болгов М.В.* О водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения. Сборник научных трудов. Барнаул: ООО «Агентство рекламных технологий», 2009. С.59-81.
- Данилов-Данжъян В.И., Георгиевский В.Ю., Асарин А.Е., Иванов А.Л.* Водные, водохозяйственные и гидроэнергетические проблемы России. В кн.: VI Всероссийский гидрологический съезд. Тезисы докладов (пленарное заседание). М.: Росгидромет, 2004.
- Данилов-Данильян В.И., Лосев КС* Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты. М.: Наука, 2006. 221 с.
- Данилов-Данильян В.И., Лосев КС.* Экологический вызов и устойчивое развитие, М.: Прогресс-Традиция, 2000. 416 с.
- Данилов-Данильян В.И.* Методологические аспекты теории социально-экономического оптимума // Экономика и математические методы. Т. 16, Вып. 1. 1980.
- Данилов-Данильян В.И.* Методологические аспекты исчисления и использования замыкающих затрат // Экономика и математические методы, Т. 23, Вып. 3. 1987.
- Данилов-Данильян В.И., Хранович ИЛ.* Производственные функции в условиях неопределенности // Экономика и математические методы. Т. 43. № 1. 2007. С. 16-26.
- Долгоносое Б.М., Кочарян А.Г.* Системная методология назначения предельно допустимых сбросов // Инженерная экология. № 1. 1998. С. 19-30.
- Думное А.Д., Борисов С. С.* Учет использования воды: основные этапы становления и проблемы современного анализа // Бюллетень Использование и охрана природных ресурсов в России. № 9-10. 2003. С.37-64.
- Елоховский СБ.* Гидроэлектростанции в водохозяйственных системах. М.: Энергия, 1979. 176 с.
- Зайцева И.С.* Некоторые региональные особенности использования водных ресурсов в современной России // Изв. РАН. Сер. геогр. № 5. 2001. С.17-27.
- Зайцева И.С.* Сравнительный анализ антропогенного воздействия на водные ресурсы России и США // Изв. РАН. Сер. геогр. № 4. 2003. С.77-85.
- Залесский А.Б.* Об однотипном подходе к учету экономических и социальных факторов при оценке эффективности локальных хозяйственных решений // Сб. трудов ВНИИСИ ГКНТ и АН СССР. Вып. 1. М.: 1980.

- Залесский А.Б.* Об эффектах нелинейности и дискретности в экономике // Сб. трудов ВНИИСИ ГКНТ и АН СССР. Вып. 5. М.: 1980.
- Клиге Р.К., Данилов НИ, Котцев В.Н.* История гидросферы. М.: Научный мир, 1998. 369 с.
- Клюквин А.Н., Кумсиашвили Г.П., Семёнова-Ерофеева СМ.* Регулирование поверхностных и подземных вод при их хозяйственном использовании (на примере бассейна Терека) // Водные ресурсы. № 1. 1981. С.56-63.
- Ковалевский В.С.* Комбинированное использование ресурсов поверхностных и подземных вод. М.: Научный мир, 2001. 331 с.
- Ковалевский В.С.* Принципы обоснования надёжности функционирования систем комбинированного использования ресурсов поверхностных и подземных вод // Водные ресурсы. Т. 30. № 6. 2003. С.758-764.
- Коваленко Б.Г., Меренков В.В.* Оптимизация планов развития орошения. Фрунзе: Киргызстан, 1972. 123 с.
- Кокорин А.О., Минин А.А.* Обзор итогов работ. В кн. Влияние изменения климата на экосистемы. М.: Русский университет, 2001. 184 с.
- Колмановский В.Б., Носов В.Р.* Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последствием. М.: Наука, 1981. 448 с.
- Концевовский С.Я., Минкин Е.Л.* Ресурсы подземных вод в водохозяйственных балансах орошаемых территорий. М.: Наука, 1986. 186 с.
- Концевовский С.Я., Минкин Е.Л.* Гидрогеологические расчеты при использовании подземных вод для орошения. М.: Недра, 1989. 253 с.
- Коровин Г.Н., Зукерт Н.В.* Влияние климатических изменений на лесные пожары в России. В кн. Климатические изменения: взгляд из России. М.: Теис, 2003. 416 с.
- Коронкевич Н.И., Зайцева КС, Черногаева Г.М.* Формы, механизмы и показатели антропогенной нагрузки на водные ресурсы // Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия. М.: Наука, 2003. С.7-21.
- Косарев А.Н., Костяной А.Г.* Проблемы кризисных озер и морей // Земля и вселенная. № 6. 2003. С.67-73.
- Кречетов Л.И.* Системы экономического стимулирования водоохраной деятельности предприятий. I. Платежи // Водные ресурсы. № 4. 1991а. С. 164—172.
- Кречетов Л.И.* Системы экономического стимулирования водоохраной деятельности предприятий. II. Рыночные системы // Водные ресурсы. №5. 1991б. С. 174-184.
- Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.* Расчет многолетнего регулирования речного стока на основе теории вероятностей // Труды ВИСУ, Гидротехнический сборник. №4. 1932. С.7-31.
- Лазебник А.И., Миронова В.Н.* Нелинейная транспортная задача с преобразованием потока в дугах // Проблемы функционирования и развития народного хозяйства. М.: ВНИИСИ, 1983. С.35-41.
- Лазебник А.И., Хранович И.Л., Цаллагова О.Н.* Обобщенные сепарабельные задачи и их приложения // Автоматика и телемеханика. № 8. 1981. С.107-118.

- Левитина Е.Ю., Письменский В.Р., Хранович И.Л.* Применение математических моделей для оценки эффективности использования водных ресурсов в оросительных системах // *Водные ресурсы*. № 5. 1990. С.128-142
- Левич А.П.* Понятие устойчивости в биологии: Математические аспекты // *Человек и биосфера*. М.: Изд-во МГУ, 1976. С. 138-174.
- Лившиц В.Н.* Учет фактора времени в задачах локальной оптимизации с помощью взвешивающих функций // *Экономика и математические методы*. Т. 7. № 6. 1971. С.833-842.
- Лосев КС, Данишов-Данильян В.И., Котляков В.М., Залиханов М.Ч., Кондратьев КЯ.* и др. Проблемы экологии России. М.: ВИНТИ. 1993. 348 с.
- Ляпунов А.М.* Общая задача об устойчивости движений. М.: Л.: Гостехиздат, 1950.472 с.
- Максаковский В.П.* Географическая картина мира. Книга 1. М.: Дрофа, 2003. 496 с.
- Мелешко В.П., Голицын Г.С, Малевский-Малевич СП., Мохов И.И.* и др. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей // *Метеорология и гидрология*. № 4. 2004. С.38^49.
- Моисеев Н.Н.* Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1975. 526 с.
- Молчанов А.М.* Об устойчивости экосистем // *Всесторонний анализ окружающей среды*: Тр. II Советско-американского симп. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С.212-229.
- Мухин А.В.* Замыкающие затраты в угольной промышленности // *Сб. трудов ВНИИСИ ГКНТ и АН СССР*. Вып. 7. М.: 1984.
- Мухин А.В.* Замыкающие затраты на минеральное сырье и их динамика. М.: 1991.
- Нейлор Т.* Машинные эксперименты с моделями экономических систем. М.: Мир, 1975. 297 с.
- Проблемы оптимального функционирования социалистической экономики. М.: Наука, 1971.
- О стратегии российского развития (аналитический доклад). М.: Горбачев-фонд, 2002.
- Опойцев В.И.* Равновесие и устойчивость в моделях коллективного поведения. М.: Наука, 1977. 245 с.
- Пряжнинская ВТ., Каплинская И.М., Шнайрман В.М.* Производственные функции оросительных систем для условий неустойчивого увлажнения // *Водные ресурсы р. Терек и их использование*. Ростов-на-Дону: Южгипроводхоз. 1983. С. 188-201.
- Райков Л.Д.* Вопросы построения и применения ЭВМ для решения многовариантных задач. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МИЭМ, 1966. 239 с. (рукопись).
- Системный подход к управлению водными ресурсами / Под ред. Бисваса А. Перевод на русский язык под ред. Н.Н. Моисеева. М.: Наука, 1985. 392 с.
- Рокафеллар Р.* Выпуклый анализ. М.: Мир, 1973. 469 с.
- Самуэльсон П.* Экономика. М.: Прогресс, 1964. 667 с.

- Светлосанов В.А.* Устойчивость и стабильность природных экосистем: (модельный аспект) (сер. Итоги науки и техники. Теоретические и общие вопросы географии.). Т. 8. М.: ВИНТИ, 1990. 200 с.
- Состояние мира 1999. М.: Весь Мир, 2000. 364 с.
- Указания по методам расчета смещения и разбавления сточных вод в реках, озерах и водохранилищах. М.: ВОДГЕО, 1971. 224 с.
- Хайлов КМ.* Водообмен на разных уровнях биологической и экологической организации // Успехи современной биологии. 118. 1998. С.305-320.
- Хранович И.Л.* Транспортная задача на сети с усилением в дугах. П. Влияние возмущений исходных данных // Автоматика и телемеханика. № 2. 1979. С. 90-99
- Хранович И.Л.* Управление водными ресурсами. Поточные модели. М.: Научный мир, 2001. 295 с.
- Четаев Н.Г.* Устойчивость движения. М.: Наука, 1965. 208 с.
- Штрауб Э.* Актуарная математика имущественного страхования. М.: Крокус, 1994. 148 с.
- Эдельштейн К.К.* Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 400 с.
- Экономическая энциклопедия. М.: Экономика, 1999.
- Эльтинер Л.И.* Качество природных вод и состояние здоровья населения в бассейне Волги // Водные ресурсы. Т. 26, № 1. 1999. С.60-70.
- Эрроу К.Дж., Гурвиц Л., Удзава Х.* Исследования по линейному и нелинейному программированию. М.: ИЛ, 1962. 334 с.
- Ярошевский Д.М.* Автоматизированная система проектирования мероприятий по регулированию стока малых рек для орошения // Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования. Ростов-на-Дону: Изд. СКНЦ ВШ/НИИМ и ПМ, 1986. С.242-250
- Brown L, Ayres E.* (Edit.) The World Watch Reader on Global Environmental Issues. N.Y. - London: W.W. Norton Co., 1998. 358 p.
- D 'Esopo D.I.* A convex programming procedure // Naval Res. Logistics Quart. V. 6. №4. 1959. P.33<sup>^</sup>2.
- Dowd R.M.* EPA's air quality bubble revisteaV/Environ Sci and Technol. V. 18. № 8. 1984. P.249A.
- Gleick P.H.* Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21-th century // Science. 302. № 5650. 2003. P. 1524-1527.
- Global Environment Outlook 2000. London: Earthscan. Publ. Ltd.. 1999. 398 p.
- Hantusch M.S.* Pompage d'essai dans un puits a proximite d'une riviere colmate // Bull. BRGM. Sect. III. № 3/4. 1976. P. 139-149.
- Hazen A.* The storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply//Trans. ASCE. V. 77. 1914. P. 1539-1659.
- Helmer R.* Water Demand and Supply // Nucl. Desalinat. Sea Water: Proc. Int. Symp., Taejon, 26-30 may, 1997. Vienna: 1997. P. 15-24.
- Holling C.S.* Resiliense and stability of ecological systems. Wien: Res. rep. IIASA: 1973. 23 p. R-R-73-3.

- Liebscher H.-L.* Conflict over water - can hydrology contribute anything toward their solution? IASH Publ. № 286. 2004. P.238-245.
- Moulders E.A., Jenkins C.T.* Analog-digital models of stream-aquifer systems // Ground water. V. 7. № 5. 1969. P. 19-24.
- O'Neil W., David M., Moore C, Joeres E.* Transferable discharge permis and economic efficiency the Fox River // J.Emiron. Econ. Manag. V. 10. № 4. 1983. P.346-355.
- Postel S.* Hydro Dynamics // Natural History. V. 112. № 4. 2003. P.60-63, 66-67.
- Rodda G.* On the problems of assessing the World water resources. In: Geosci. and water resource environment data model. Berlin - Heidelberg. 1997. P. 14—32.
- Shiklomanov L.A., Balonishnikova J.A.* World water use and water availability: trends, scenarios, consequences // W<sup>r</sup>ater Resources Systems - Hydrological Risk, Management and Development. IAHS Publ.. № 281. 2003. P.358-364.
- Streeter H. W., Phelps E.B.* A study of the pollution and natural purification of the Ohio river//Public Health Service. Washington: D.C., V. 146. 1925. P. 1-75.
- Taylor O.J., Luckey R.R.* Water management studies of a stream-aquifersystem, Arkansas river valley, Colorado // Ground water. V. 12. № 1. 1974. P.22-38.
- The World Environment, 1972-1992. London: Chapman and Hall. 1992. 884 p.
- Xia Jun, Yongqin David Chen.* Water Problems and Opportunities in the Hydrological Sciences in China // Hydrological Sciences J. 46. № 6. 2001. P.907-921.
- Young R.A., Brodehoeft J.D.* Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive use of grounds ater and surface water // Water resources research. V. 8. № 3. 1972. P.553-556.