

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

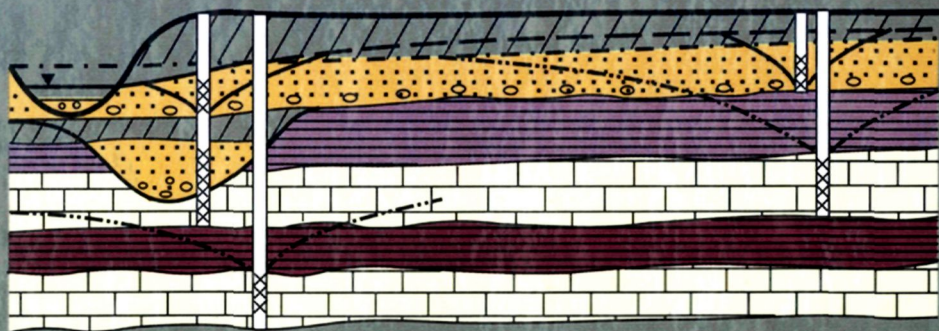
Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,  
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.  
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .  
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.  
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

**В.С. КОВАЛЕВСКИЙ**

# **КОМБИНИРОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД**



**НАУЧНЫЙ МИР**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
INSTITUTE OF WATER PROBLEMS

**V.S. KOVALEVSKY**

**COMBINE USE  
OF SURFACE  
AND GROUND WATER**

**MOSCOW  
SCIENTIFIC WORLD  
2001**



**В.С. КОВАЛЕВСКИЙ**

**КОМБИНИРОВАННОЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

МОСКВА  
НАУЧНЫЙ МИР  
2001

УДК 556.3.626.81+637.67.

ББК 26.222

K56

*Ковалевский В.С.*

**Комбинированное использование ресурсов поверхностных и подземных вод.** – М.: Научный мир, 2001. – 332 с.

ISBN 5-89176-127-0

В работе рассматриваются теоретические и методические основы надежности функционирования систем совместного использования поверхностных и подземных вод (СИПВ). В том числе разработана концепция СИПВ, рассмотрены закономерности чередований маловодных и многоводных серий, предложена методика динамико-стохастического моделирования внутригодового гидродинамического режима подземных вод. Разработана методика оптимизации выбора производительности компенсационных водозаборов подземных вод для покрытия дефицитов поверхностного стока, рассмотрены экологические и экономические аспекты функционирования СИПВ. Разработанные методологические подходы апробированы на ряде примеров малых водосборов незарегулированных рек Московского региона, что показало возможность повышения использования водных ресурсов в 3–5 раз.

УДК 556.3.626.81+637.67.

ББК 26.222



*V.S.Kovalevsky*

**Combine use of surface and ground water.** – Moscow: Scientific World, 2001. – 332 p.

The book represents the theoretical and methodological basis of the problem guaranteed operation the system of combine use surface and ground water (CUSGW), including the conception of CUSGW, natural regularities of intermediation of low and abound water series, method of simulation interannual variations of hydrodynamic regime, methodology of optimization ground water withdrawal to cover surface water deficits The ecological and economic problems connected with CUSGW discovered The application results of the elaborated approaches are realized on several examples for Moscow region. It was shown the possibilities to increase water use in 3–5 times.

ISBN 5-89176-127-0

© В.С. Ковалевский, 2001

© Научный мир, 2001

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>Введение .....</b> | <b>11</b> |
|-----------------------|-----------|

## ЧАСТЬ I

### МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБОСНОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Глава 1.</i> Состояние проблемы и концепция совместного использования поверхностных и подземных вод .....                                                                          | 17 |
| <i>Глава 2.</i> Закономерности многолетней изменчивости подземного стока и выбора оптимальных расчетных обеспеченностей водоотбора .....                                              | 33 |
| <i>Глава 3.</i> Методика моделирования вероятного прогнозного внутригодового и многолетнего гидродинамического режима подземных вод .....                                             | 59 |
| <i>Глава 4.</i> Методология выбора оптимального водоотбора подземных вод с учетом гарантированности восполнения срабатываемых запасов и допустимых ущербов поверхностному стоку ..... | 72 |
| 4.1. Безнапорный водоносный горизонт, гидравлически взаимосвязанный с незарегулированным поверхностным стоком .....                                                                   | 74 |
| 4.2. Напорный водоносный горизонт с опосредованной гидравлической связью поверхностных и подземных вод .....                                                                          | 89 |

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3. Напорный водоносный горизонт,<br>практически не взаимосвязанный<br>с поверхностным стоком .....                       | 100 |
| <i>Глава 5. Экологические и экономические аспекты</i>                                                                      |     |
| функционирования систем совместного использования<br>поверхностных и подземных вод .....                                   | 109 |
| 5.1. Экологические преимущества систем<br>комбинированного использования поверхностных<br>и подземных вод .....            | 109 |
| 5.2. Экономические оценки функционирования систем<br>комбинированного использования поверхностных<br>и подземных вод ..... | 129 |

## ЧАСТЬ II

### ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗНЫХ ОЦЕНОК НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Глава 6. Закономерности многолетней изменчивости<br/>гидродинамического режима подземных вод<br/>Московского региона .....</i> | 152 |
| <i>Глава 7. Ресурсы подземных вод Московского региона .....</i>                                                                   | 190 |
| 7.1. Естественные ресурсы подземных вод региона .....                                                                             | 190 |
| 7.1.1. Основные понятия и определения .....                                                                                       | 190 |
| 7.1.2. Изученность ресурсов подземных вод<br>Московского региона .....                                                            | 199 |
| 7.1.3. Особенности гидрогеологического<br>строения Московского региона .....                                                      | 202 |
| 7.1.4. Оценка естественных ресурсов<br>подземных вод .....                                                                        | 216 |
| 7.2. Потенциальные эксплуатационные ресурсы<br>поверхностных и подземных вод<br>малых водосборов .....                            | 226 |

|                                                                                                                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 8. Влияние предстоящих изменений климата на ресурсы подземных вод</b> .....                                                                                                               | <b>230</b> |
| 8.1. Особенности сверхдолгосрочных гидрогеологических прогнозов .....                                                                                                                              | 230        |
| 8.2. Методы прогнозов .....                                                                                                                                                                        | 233        |
| 8.2.1. Прогнозы, основанные на зависимостях коэффициента подземного стока от степени водности года .....                                                                                           | 234        |
| 8.2.2. Прогнозы, основанные на многофакторных связях (множественной корреляции) .....                                                                                                              | 238        |
| 8.2.3. Прогнозы по моделям с сосредоточенными параметрами .....                                                                                                                                    | 241        |
| 8.2.4. Прогнозы на основе экстраполяции трендов .....                                                                                                                                              | 244        |
| 8.3. Оценка воздействий изменений климата на ресурсы подземных вод Московской области .....                                                                                                        | 246        |
| <b>Глава 9. Оценка возможностей повышения водообеспеченности малых незарегулированных водосборов Московской области за счет комбинированного использования поверхностных и подземных вод</b> ..... | <b>255</b> |
| <b>Глава 10. Перспективы повышения водообеспеченности водосборов зарегулированных рек и надежности отдачи водохранилищ питьевого назначения</b> .....                                              | <b>282</b> |
| <b>Глава 11. Периодическое использование подземных вод для погашения дефицитов в региональной водохозяйственной системе Московской области</b> .....                                               | <b>302</b> |
| <b>Выводы и заключение</b> .....                                                                                                                                                                   | <b>319</b> |
| <b>Литература</b> .....                                                                                                                                                                            | <b>326</b> |



# TABLE OF CONTENT

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>Introduction .....</b> | <b>11</b> |
|---------------------------|-----------|

## PART I

### METHODICAL BASEMENT FOR GROUND OF RELIABILITY OF FUNCTIONING OF SURFACE AND GROUNDWATER SYSTEMS COMBINE DEVELOPMENT

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Chapter 1.</i> Problem state and concept of surface<br>and groundwater combine use .....                                                                                                   | 17 |
| <i>Chapter 2.</i> Regularity of long-term changes in groundwater<br>flow and selection of withdrawal optimal<br>rated frequency .....                                                         | 33 |
| <i>Chapter 3.</i> Methods for modeling of possible annual<br>and long-term hydro dynamic groundwater regime .....                                                                             | 59 |
| <i>Chapter 4.</i> Methodology of groundwater optimal withdrawal<br>section with due regard for guarantee<br>of groundwater reserves replenishment and surface<br>flow admissible damage ..... | 72 |
| 4.1. Unconfined aguifer hydraulically connected with<br>natural runoff .....                                                                                                                  | 74 |
| 4.2. Cofmed aguifer with indirect connection<br>of surface and ground water .....                                                                                                             | 79 |

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3. Confined aguifer really disconnected with runoff .....      | 100 |
| <i>Chapter 5. Ecological and economic aspects of functioning</i> |     |
| of surface and groundwater combine use systems .....             | 109 |
| 5.1. Ecological advantages of surface                            |     |
| and groundwater combine use systems .....                        | 109 |
| 5.2. Economic assessment for functioning                         |     |
| of surface and groundwater combine                               |     |
| use systems .....                                                | 129 |

## PART II

### PECULIARITIES OF FORECAST ASSESSMENT OF RELIABILITY OF FUNCTIONING OF SURFACE AND GROUNDWATER COMBINED USE SYSTEMS IN DIFFERENT TYPICAL NATURAL AND TECHNOGENIC CONDITIONS IN MOSCOW REGION

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Chapter 6. Regularities of long-term changes</i>            |     |
| in groundwater hydrodynamic regime                             |     |
| in Moscow region .....                                         | 152 |
| <i>Chapter 7. Groundwater resources in Moscow region .....</i> | 190 |
| 7.1. Regional groundwater natural resources .....              | 190 |
| 7.1.1. Main notions and definitions .....                      | 190 |
| 7.1.2. Exploration of groundwater resources                    |     |
| of Moscow region .....                                         | 199 |
| 7.1.3. Peculiarities of hydrogeological structure              |     |
| of Moscow region .....                                         | 203 |
| 7.1.4. Estimation of natural ground                            |     |
| water resources .....                                          | 216 |
| 7.2. Potential safe surface and groundwater                    |     |
| yield of small watershed .....                                 | 226 |
| <i>Chapter 8. Impending climate changes impact</i>             |     |
| on groundwater resources .....                                 | 230 |
| 8.1. Super-long-term hydrogeological                           |     |
| forecast peculiarities .....                                   | 230 |
| 8.2. Forecast methods .....                                    | 233 |
| 8.2.1. Forecast, based on groundwater                          |     |
| flow coefficient .....                                         | 234 |

---

|                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.2.2. Forecast, based on multifactor connections .....                                                                                                                           | 238 |
| 8.2.3. Forecast of concentrated parameters models .....                                                                                                                           | 241 |
| 8.2.4. Forecast, based on the trends extrapolation .....                                                                                                                          | 244 |
| 8.3. Assessment of climate changes impact on groundwater resources in Moscow region .....                                                                                         | 246 |
| <i>Chapter 9.</i> Assessment of possibilities of water situation improvement for small non-regulated watersheds in Moscow region due to surface and groundwater combine use ..... | 255 |
| <i>Chapter 10.</i> Outlooks for the improvement of withdrawals water situation regulated rivers and reliability of the efficiency of reservoirs for drinkable water .....         | 282 |
| <i>Chapter 11.</i> Periodic groundwater use for extinction of deficits in regional hydroeconomic system of Moscow region .....                                                    | 302 |
| <b>Conclusion</b> .....                                                                                                                                                           | 319 |
| <b>References</b> .....                                                                                                                                                           | 326 |

---

## ВВЕДЕНИЕ

Тревожное, а в ряде районов мира кризисное состояние окружающей среды вызвало к жизни концепцию так называемого «обеспечения устойчивого развития общества» (sustainable development), провозглашенную ЮНЕСКО в 1999 г. в Рио-де-Жанейро и поддержанную большинством стран мира, включая и Россию. Концепция содержит различные гуманитарные, социальные и природоведческие аспекты существования человечества и биосферы Земли в целом, определяющие стратегию постоянно поддерживаемого (регулируемого), не разрушающего окружающую среду социально-экологического развития цивилизации. Все это должно обеспечить экологическую безопасность общества от антропогенных угроз.

Главным лейтмотивом природоведческого аспекта концепции является требование или настойчивая рекомендация пересмотреть многие не редко устоявшиеся принципы природопользования, сделав их минимально ущербными для окружающей среды и жизнедеятельности будущего поколения, т.е. не истощая, там, где это возможно, природные ресурсы и сохраняя в должном виде среду для потомства.

Целью таких рекомендаций ставится предотвращение появления чрезвычайных экологических ситуаций (ЧЭС) и тем более состояния экологического бедствия. При этом под ЧЭС понимается экологически опасное состояние природной среды для жизни и здоровья людей, требующее принятия неотложных защитных мер для устранения такой ситуации. Чрезвычайная экологическая ситуация, приводящая к необратимым изменениям природной среды и условий жизнедеятельности людей, характеризуется как экологическое бедствие.

Подобные рекомендации имеют несомненно прямое отношение и к гидрогеологическим аспектам природопользования, связанным прежде всего с вопросами охраны подземных вод от истощения и загрязнения, а также сохранения компонентов окружающей среды, взаимосвязанных с

подземными водами. В частности, в нашей стране узаконена и широко внедрена в практику оценка эксплуатационных запасов подземных вод на определенный срок. При этом сработка напоров и частичное осушение водоносного пласта, если они осуществляются за расчетный срок, не считаются истощением запасов подземных вод. И, казалось бы, резонно задать вопрос, почему бы не создавать такие более экономичные водозаборы, если они позволяют обеспечить города водой на 25 лет, а иногда и до 50 лет, и лишь по истечении этих сроков, когда запасы будут сработаны, изыскивать новые источники водоснабжения. К сожалению, подобные расчетные сроки довольно быстро проходят, а потребность в воде не исчезает. В результате многие централизованные водозаборы России находятся сейчас на грани реального истощения запасов подземных вод. Только в Московском регионе свыше десятка городов находятся в состоянии практически сработанных напоров водоносных горизонтов или на грани этого. В условиях же развившейся региональной воронки депрессии возникает серьезнейшая проблема, где изыскать новые источники водоснабжения. Для этого возможно потребуются транспортировка воды на значительные расстояния с окраин региона, что вызовет значительные единовременные капитальные затраты. Кроме того, интенсивная и длительная эксплуатация подземных вод не редко приводит к многочисленным неблагоприятным экологическим последствиям: снижению поверхностного стока; оседаниям земной поверхности; активизации карстовых процессов; осушению колодцев, болот, самовозгоранию торфов, угнетению водных и наземных экосистем и другим [26].

При ориентации же на неограниченную по времени и бескризисную эксплуатацию подземных вод (в соответствии с концепцией устойчивого развития общества) подходы к разведкам и оценкам запасов подземных вод должны быть в определенной части пересмотрены. Главным критерием при этом должно стать условие водоотбора, не превышающего обеспеченного естественного восполнения, и с минимальными негативными последствиями в среде. В этой связи за рубежом уже многие годы ведется борьба против так называемой переексплуатации (*overexploitation* или *overdevelopment*) подземных вод с требованием непревышения водоотбора над естественным питанием подземных вод. Особенно остро эта проблема стоит на островах и прибрежных территориях, а также в районах с напряженным водным балансом, где переексплуатация приводит не только к истощению запасов подземных вод, но и к снижению их качества за счет подсоса соленых морских или некондиционных подземных вод. Это делает данную проблему жизненно важной для населения таких районов.

Неограниченная во времени эксплуатация подземных вод с гарантированным восполнением их запасов может осуществляться в трех вариантах:

1. Инфильтрационными водозаборами, заложенными вдоль рек с гидравлической взаимосвязью поверхностных и подземных вод, а также за счет каптажа родникового стока. Восполнение запасов подземных вод в этом случае обеспечивается естественным их питанием, а также перехватом части транзитного стока рек инфильтрационными водозаборами. Многочисленные такие водозаборы успешно функционируют многие годы. Их единственным недостатком является ограниченность вододобора величиной расходов рек в межень, т.е. необходимостью сохранения определенного минимального стока в реках для поддержания их экологического состояния. Такая проблема не редко возникает при создании водозаборов в долинах малых рек с минимальными меженными расходами стока, соизмеримыми с потребностью в воде.

2. Водозаборами на напорные воды с перетеканием при условии ограничения водоотбора максимально возможным перетеканием при установившихся понижениях, не превышающих допустимых. Такие водозаборы также могут существовать неограниченно долго, т.к. воронка депрессии под влиянием такого водозабора будет развиваться до тех пор, пока отбор не будет компенсироваться естественным питанием подземных вод в ее пределах. Восполнению запасов подземных вод в таких условиях будет способствовать снижение испарения и перехват транзитного стока, допустимость ущерба которому может быть оценена. При этом не учитываются и другие факторы стабилизации уровней (упругие запасы, отжатия воды из глин, сброс возвратных вод и др.), роль которых является временной или неопределенной.

Вместе с тем и такой водоотбор неизбежно проявится на речном стоке и уровнях грунтовых вод. Поэтому допустимость такого водоотбора должна обосновываться с экологических позиций.

3. И, наконец, также неограниченно долго могут работать водозаборы, ориентированные на совместное или комбинированное использование поверхностных и подземных вод. При этом поверхностные и подземные воды не противопоставляются как альтернативные источники водоснабжения, как это было ранее, а рассматриваются как единая водно-ресурсная система, в которой один компонент в нужный момент дополняет другой.

В том числе поверхностные воды эксплуатируются непосредственно или при помощи инфильтрационных водозаборов в основном в многоводные периоды, а подземные воды, обладающие ограниченными запаса-

сами и питанием в среднем в 4–5 раз меньшим, чем поверхностные, эксплуатируются периодически только в отдельные маловодные периоды для покрытия дефицитов поверхностного стока. Компенсационный водозабор закладывается на подземные воды с таким расчетом, чтобы ущерб поверхностному стоку в наиболее маловодные периоды не превысил допустимых пределов. Подобная эксплуатация не только позволяет, как будет показано ниже, повысить в 4–5 раз и более потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод, но и решить многие экологические проблемы, вызываемые переэксплуатацией подземных вод. Наиболее эффективна и целесообразна подобная эксплуатация водных ресурсов в долинах малых рек при меженных расходах рек, соизмеримых и тем более меньших современных и перспективных потребностей в хозяйственно-питьевой воде, т.е. в районах с напряженным водным балансом. В связи с тем, что методология первого и второго вариантов оптимальной эксплуатации подземных вод достаточно хорошо разработана, целесообразным представляется рассмотреть методологию, а также особенности и преимущества систем комбинированного использования поверхностных и подземных вод, т.к. подобных систем в нашей стране пока не существует. При этом важно не только рассмотреть методологию обоснования наиболее рациональных форм функционирования таких систем в различных природно-техногенных условиях, но и осуществить апробацию таких подходов применительно к реальным условиям и типовым расчетным схемам.

В работе над монографией принимали участие А.В. Ефременко, О.Л. Федотова, С.В. Якимова, Ю.В. Ковалевский, а также Л.П. Новоселова. Разработка концептуальных, методологических и практических аспектов проблемы была поддержана РФФИ (гранты 96-05-65120 и 00-05-64416).

**ЧАСТЬ I**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ОБОСНОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ  
СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ  
И ПОДЗЕМНЫХ ВОД**



---

Как было отмечено выше, систем совместного или комбинированного использования поверхностных и подземных вод, при которых подземные воды используются главным образом для покрытия дефицитов поверхностного стока, в нашей стране пока не существует.

Внедрение таких систем в жизнь требует соответствующего научно-методического обоснования, включая:

1) формулирование современной концепции совместного использования поверхностных и подземных вод, определяющей структуру необходимых исследований по обоснованию создания таких систем;

2) разработку научно-методических основ комплексного обоснования надежности функционирования систем совместного использования поверхностных и подземных вод, обеспечивающих повышение гарантированной отдачи водно-ресурсной системы в целом;

3) разработку методологии рациональных режимов управления системами совместного использования поверхностных и подземных вод, в том числе эффективных режимов отбора подземных вод с гарантией восполнения запасов подземных вод;

4) апробацию на конкретных примерах обоснования функционирования систем комбинированного использования поверхностных и подземных вод с анализом эффективности, а также экологических и экономических преимуществ таких систем по сравнению с раздельным использованием поверхностных и подземных вод.

В основу используемых для решения данной задачи материалов положены результаты многолетних исследований автора по изучению закономерностей многолетней изменчивости режима уровней подземных вод и подземного стока, по взаимодействию поверхностных и подземных вод, разработке методологии оценок и прогнозов ресурсов подземных вод, в том числе в связи с изменениями климата, обобщения по влиянию изменений гидрогеологических условий на окружающую среду. В основу исследований были также положены данные государственных гидрологических и гидрогеологических стационарных наблюдений, материалы разведок эксплуатационных запасов подземных вод и другие фондовые и проектные материалы.

---

## *Глава 1*

# **СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И КОНЦЕПЦИЯ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Одним из важнейших условий обеспечения устойчивого (без экологических и социальных кризисов) развития общества можно с уверенностью назвать гарантированное удовлетворение потребностей его членов в качественной питьевой воде в необходимых количествах. Решение этой задачи в последние годы чаще всего связывалось с созданием водозаборов на подземные воды, характеризующихся лучшей защищенностью от различных видов загрязнений с поверхности земли, в том числе от радиоактивного заражения. К сожалению, запасы подземных вод, особенно вблизи крупных водопотребителей, ограничены и во многих случаях их использование лимитировалось расчетным сроком оценки запасов (обычно 25 лет). По истечении такого срока нередко предусматривается их истощение, сработка допустимых напоров и, в итоге, необходимость изыскания новых источников водообеспечения. Такая проблема стоит перед рядом городов Московской области.

Кроме того, различные гидрогеологические и гидрологические исследования, опыт эксплуатации подземных вод и моделирования работы водозаборов показывают, что эксплуатация даже достаточно глубоко залегающих напорных водоносных горизонтов в артезианских бассейнах со временем начинает сказываться на поверхностном стоке. Использование ресурсов последних также часто ограничено различными санитарными и экологическими нормами, а также хозяйственными условиями, о чем будет сказано ниже. В этой связи особую актуальность приобретает разработка рациональных форм использования водных ресурсов, особенно для регионов с напряженным водным балансом. Кри-

терием наиболее оптимального освоения водных ресурсов в пределах какого-либо административного или природного региона может служить их наиболее полное и неограниченное во времени использование при допустимых изменениях в окружающей среде, а еще лучше – без таковых, т.е. без конфликта с будущим поколением. Соблюдение таких условий предопределяет прежде всего непревышение суммарного водоотбора над естественным среднесуточным восполнением водных ресурсов в целом. Любые другие варианты использования водных ресурсов, допускающих их истощение, следует рассматривать лишь в случае, если по каким-либо природным или хозяйственным условиям создание оптимальных схем водоснабжения не представляется возможным или целесообразным по технико-экономическим соображениям.

Одной из основных трудностей рационального использования водных ресурсов является неравномерность их естественного восполнения как внутри года, так и за многолетие. Как известно, поверхностный сток многих рек до 50–70% и более проходит лишь в кратковременный паводковый период. В засушливых регионах нередко весь сток малых рек проходит в паводок, после чего реки пересыхают. Дебиты карстовых родников, тесно зависящих от режима выпадения атмосферных осадков и широко используемых для водоснабжения, в периоды питания подземных вод могут увеличиваться в 20–600 раз по сравнению с меженными их величинами, а также не редко иссякают в межень. Все это предопределяет наличие значительного и часто бесполезного стока в паводки и нехватку водных ресурсов в маловодные периоды, что затрудняет возможность организации стабильного во времени водообеспечения населения и промышленности.

Повышение коэффициента круглогодичного использования водных ресурсов связывалось обычно либо с зарегулированием поверхностного стока водохранилищами, либо с переводом водоснабжения на подземные (чаще напорные) воды, не подверженные столь существенным изменениям во времени. Однако создание водохранилищ не всегда может быть оправданным по различным причинам (социальным, экологическим, орографическим, геологическим и др.), а ресурсы и запасы подземных вод, к сожалению, ограничены и не в состоянии покрыть все потребности в воде, особенно, когда эти потребности велики и соизмеримы с меженными расходами рек и допустимыми отъемами из них. Решению этой задачи может способствовать совместное использование поверхностных и подземных вод.

До настоящего времени в нашей стране поверхностные и подземные воды использовались, как правило, отдельно и не редко рассматрива-

лись как альтернативные источники водоснабжения. Более того, подземные воды, учитывая ограниченность их запасов и, главное, меньшую подверженность загрязнению были закреплены законом на их использование исключительно для хозяйственно-питьевого водоснабжения, что как бы выделяло их из общих водных ресурсов водосборов.

Эти положения были закреплены в ГОСТ 2761-84 «Источники централизованного хозяйственно-питьевого назначения. Правила выбора и оценка качества», а также в ГОСТ Р22.6.01-95 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита систем хозяйственно-питьевого водоснабжения. Общие требования». Оговаривается также требование, что минимальная доля подземных вод в общем объеме водоснабжения города должна обеспечить бесперебойную подачу воды населению при отключении головных сооружений поверхностных водоисточников на период их аварийного загрязнения.

При этом предусматривается, что техническое водоснабжение должно осуществляться за счет поверхностных вод, что кстати далеко не всегда соблюдается. Тем не менее, в этой связи многие города России в последние годы были переведены (там, где это было возможно) на водоснабжение из подземных источников. В тех же случаях, когда потребности в воде велики, как например в Москве, Санкт-Петербурге, основное хозяйственно-питьевое водоснабжение (до 90%) до сих пор осуществляется в основном за счет поверхностных вод. Использование подземных вод здесь планировалось лишь в качестве резервного источника водоснабжения в случае разного рода загрязнений или заражений поверхностных вод. Следует однако подчеркнуть, что подобное раздельное использование поверхностных и подземных вод хотя в отдельных случаях и целесообразно, но не позволяет в полной мере освоить имеющиеся водные ресурсы в районе. В том числе стабильное круглогодичное использование как поверхностных, так и подземных вод, обычно лимитируются допустимым отбором поверхностных вод в маловодный год. В итоге большая часть водных ресурсов как поверхностных, так и подземных, в маловодные периоды года и тем более в многоводные годы остается неиспользуемой. В тоже время в маловодные годы или периоды года воды часто не хватает.

Не отрицая необходимость иметь для каждого крупного города или области гарантированный по качеству подземный источник водоснабжения, обеспечивающий необходимую минимальную потребность населения в питьевой воде, рациональное освоение водных ресурсов, особенно когда они соизмеримы с общей потребностью в воде, возможно лишь на базе систем совместного использования поверхностных и подземных

вод, позволяющего не редко в несколько раз повысить коэффициент использования водных ресурсов.

Практическая реализация совместного использования поверхностных и подземных вод осуществлялась до настоящего времени в следующих трех основных вариантах:

1. Наиболее распространенным является создание водозаборов инфильтрационного типа, закладываемых вдоль постоянных водотоков или водоемов с наличием гидравлической связи поверхностных и подземных вод. В этом случае эксплуатация подземных вод вызывает перехват поверхностного стока и производительность водозабора определяется в основном его размерами. Поэтому максимально возможные эксплуатационные запасы подземных вод водозабора инфильтрационного типа как в условиях совершенной гидравлической связи поверхностных и подземных вод, т.е. при подпертом режиме фильтрации, так и в условиях затрудненной гидравлической взаимосвязи, т.е. в режиме дождевания, определяется даже лимитируется, как уже указывалось выше, минимальными среднемесячными или минимальными 30-суточными расходами рек в маловодный год обычно 95% обеспеченности<sup>1</sup>.

Дополнительным ограничительным условием здесь могут быть поставлены: а) необходимость сохранения санитарного стока заданной величины, а также б) не превышение ущерба речному стоку заданной величины, например, свыше 25% от меженного расхода реки в маловодный год для сохранения экологического равновесия. В отдельных случаях при соблюдении этих требования возникают различные другие дополнительные нуждающиеся в учете условия, например, обеспечение бесперебойности судоходства с сохранением необходимых глубин реки на перекачках (например, на р. Оке), обязательность затопления пойм важных для нереста ценных пород рыб (например, на р. Урал) и др.

Заложенный как бы на подземные воды водозабор инфильтрационного типа эксплуатирует реально поверхностные воды, создавая лишь условия для их частичного самоочищения, главным образом от взвешенных наносов, частично от бактериального загрязнения и некоторых хорошо сорбируемых химических загрязнений.

---

<sup>1</sup> В соответствии со СНиП 2.04.02-84 вероятность превышения среднегодовых, среднемесячных и среднесуточных расходов воды поверхностных водоемисточников дифференцируется в зависимости от категории систем водоснабжения по надежности подачи воды в пределах от 95 до 85%. При этом предусматривается возможность согласования с органами по регулированию использования и охране вод и государственного санитарного надзора допустимость изменений в стоке в критические по водности периоды.

Управление водоотбором с целью его повышения по сравнению с расчетным минимальным возможно в таких условиях лишь в случае наличия резервных емкостей водоносного горизонта т.е. когда фактическое понижение динамических уровней в эксплуатационных скважинах сохраняется в межень менее расчетного допустимого. Такое положение может рассматриваться как недооценка эксплуатационных запасов и их нерациональное использование.

Однако преднамеренное создание подобных резервных емкостей в водоносных горизонтах для их использования в целях покрытия дефицитов в отдельные маловодные периоды может иметь смысл, особенно если заявленная потребность в воде может быть удовлетворена на участке водозабора при сохранении таких резервов. Создание таких резервов может быть осуществлено, например, за счет удлинения ряда эксплуатационных скважин по сравнению с минимально достаточным или принятием допустимого понижения менее предельного.

Наличие таких резервов позволяет ориентироваться при планировании водозаборов не на лимитированные меженные расходы рек 95% обеспеченности, а на менее «жесткие» условия вероятных изменений стока. Проблема научного обоснования повышения расчетной обеспеченности стока была поставлена автором в 1979 г. Решение этой проблемы основывалось на исследовании закономерностей чередований маловодных и многоводных лет и выявление возникающих дефицитов стока, которые могли бы быть покрыты сработкой резервных емкостей водоносных горизонтов. Выполненный совместно с Г.И. Семькиной анализ многолетней изменчивости меженного поверхностного или подземного стока в районе водозаборов такого типа показал возможность повышения указанной расчетной обеспеченности стока до 90 и даже 80% с покрытием возникающих дефицитов в маловодные годы за счет форсированной сработки резервных емкостей водоносного горизонта, что позволило обосновать возможность увеличения среднемноголетней производительности водозаборов на 20–25% [23, 28]. Вместе с тем, в силу тесной гидравлической связи поверхностных и подземных вод, любое увеличение водоотбора подземных вод неизбежно приводит к снижению поверхностного стока. На водозаборах такого типа это происходит уже через несколько часов или несколько первых дней. Поэтому возможность погашения дефицитов за счет форсированной эксплуатации подземных вод ставится в зависимость от решения вопроса о допустимости предстоящих ущербов поверхностному стоку, что не всегда возможно по указанным различным экологическим соображениям, условиям обеспечения нужд различных водопотребителей, расположенных ниже по потоку, и др.

Несмотря на простоту и экономическую предпочтительность водозаборов инфильтрационного типа они обладают и рядом недостатков. К таковым прежде всего следует отнести растянутость коммуникаций и часто значительные зоны отчуждения ценных земель. Небольшие мощности водоносных горизонтов и обусловленные этим небольшие допустимые понижения и производительность эксплуатационных скважин вынуждают создавать линейные ряды скважин, протяженностью иногда в несколько километров, что создает значительные затруднения в установлении зон санитарной охраны и определяет существенные эксплуатационные затраты.

2. Другой способ практикуемого совместного использования по верхностных и подземных вод основывается на перехвате и поглощении паводкового поверхностного стока в аллювиальные отложения долин рек. Эксплуатационные скважины в этом случае закладываются в один или несколько рядов параллельно реке с целью наиболее полной ежегодной сработки емкости водоносного горизонта, приуроченного к аллювию и взаимосвязанным с ним коренным отложениям. Восполнение сработанных в маловодный период года запасов подземных вод осуществляется в последующий паводок. В долинах рек с периодическим пересыхающим или перемерзающим стоком интенсивность восполнения сработанных запасов подземных вод определяется объемом и продолжительностью существования речного стока. Управление восполнением запасов подземных вод в таких условиях возможно лишь техническими средствами, регулированием стока плотинами, способствующими увеличению поглощения поверхностного стока и его перевода в подземные воды. Сформировавшееся таким образом месторождение подземных вод представляет собой подземное водохранилище сезонного регулирования, имеющее определенные преимущества перед поверхностными водохранилищами прежде всего за счет снижения возможностей загрязнений воды с поверхности, практического исключения расходования накопленных поверхностных и подземных вод на испарение, что особенно важно в зонах с засушливым климатом, а также за счет самоочищения поверхностных вод.

В подобных условиях работают водозаборы в Центральном Казахстане (в долинах рек Сары-Су, Нура, Шурубай-Нура и др.), а также в зонах развития мерзлоты (в долинах рек Талнах, Алдан и др.).

В долинах с постоянным стоком (типа Северского Донца) восполнение сработанных в межень запасов подземных вод также главным образом осуществляется в паводок при затоплении пойм. Однако частичное подпитывание подземных вод происходит здесь под руслом рек кругло-

годишно в виде дождевания. Управление восполнением запасов подземных вод в таких условиях возможно различными способами их искусственного возобновления (дноуглубительными работами, закачкой воды в скважины, созданием поглотительных колодцев и прудов на пойме и др.), способствующими переводу поверхностного стока в подземные емкости. Так, в долине р. Лобрегат (Испания) распашку русла для таких целей проводят ежегодно в межень. Однако, эффективность этой меры как показал многолетний опыт постепенно снижается за счет кольматации русловых отложений мутными паводковыми водами [81]. Поэтому здесь и в долине р. Безоз дополнительно используют нагнетательные скважины, закачивающие поверхностные воды в водоносный горизонт. До 70% закаченной воды затем отбирается водозабором, а 30% – теряется на подрусловой сток.

Ограниченность подземных емкостей в эксплуатируемых водоносных горизонтах, а также потребность в воде, соизмеримая с запасами подземных вод, не позволяют во всех этих случаях осуществлять многолетнее регулирование запасами подземных вод. Поэтому их сработка и восполнение осуществляются ежегодно. Повышение же эффективности использования водных ресурсов в таких районах может быть связано лишь с управлением поверхностного стока.

Качество подземных вод на водозаборах как первого, так и второго типов прямо зависит от качества поверхностных вод, и поэтому такие водозаборы лишь с определенной условностью могут служить альтернативой непосредственному использованию поверхностных вод. Вместе с тем подобная система совместного использования поверхностных и подземных вод несомненно повышает возможности более полного использования водных ресурсов в целом с относительно более высоким качеством воды по сравнению с поверхностным источником.

3. Одним из наиболее эффективных и перспективных современных способов совместного использования поверхностных и подземных вод представляется вариант периодической эксплуатации подземных вод для погашения дефицитов в поверхностном стоке, возникающих в отдельные маловодные годы или маловодные периоды внутри каждого года. Такие системы активно используются уже многие последние годы в ряде индустриально развитых стран с ограниченными водными ресурсами (Англия, Франция, Испания, Израиль). Основным источником водоснабжения при этом являются поверхностные воды, т.е. водоотбор осуществляется прямо из реки. Подземные воды эксплуатируются только в маловодные периоды, когда воды в реке не хватает. Вода из скважин чаще всего сбрасывается непосредственно в реку. Расстояние эксплуата-



онных скважин от реки выбирается с таким расчетом, чтобы ущерб поверхностному стоку в период эксплуатации подземных вод оказался бы минимальным, желательно в пределах точности гидрологических измерений. В связи с тем, что со временем ущерб стоку неизбежно будет расти и может стать соизмеримым с водоотбором из подземных вод, непрерывная или слишком продолжительная их эксплуатация потеряет смысл. Поэтому эксплуатация подземных вод лимитирована во времени. Водозабор на подземные воды может располагаться в районе водозабора, забирающего поверхностный сток, ниже или выше последнего по потоку. В последнем случае откачиваемые воды также сбрасываются в реку, которая служит им естественным водопроводом. Восполнение сработанных запасов подземных вод осуществляется естественным путем в последующий за маловодным многоводный период как за счет подземного стока с водораздельной части водосбора, так и главным образом за счет перехвата речного стока. В конечном итоге река также не дополучит откаченные подземные воды, но уже в многоводный период, когда дефицита в воде нет. Подобная система управления водными ресурсами во многих странах считается не только оправданной, но и единственно возможной, особенно в районах с ограниченными ресурсами подземных вод и мало-водообильными реками. Так, в Англии подобное регулирование водных ресурсов осуществляется в бассейнах рек Lambourn, Thet, Wylye, Itchen, Candower Stream, Tern, Perry, Ouse, Waveney, Wissey [82]. В бассейнах рек с ограниченными запасами подземных вод, а также в узких долинах, где скважины можно разместить слишком близко от реки, что приведет к быстрому росту ущербов поверхностному стоку, водозаборы-доноры закладываются в соседних долинах. Распространенные в этом регионе основные водовмещающие отложения представлены трещиноватыми породами (мел, песчаники), для которых характерна повышенная водообильность вдоль рек и ее затухание к водоразделам. Эта закономерность способствует практическому отсутствию взаимодействия эксплуатируемых участков подземных вод в долинах-донорах с соседними долинами рек, используемых в качестве основного источника водоотбора. Такие переброски подземных вод проводятся из бассейна р. Stour в р. Pant-Black Water, из р. Wye в р. Severn, из р. Thet в р. Pant, из р. Stour в р. Themes, из р. Tyne в р. Tecs [82, 83].

Наиболее перспективным с позиций получения качественной питьевой воды в отличие от существующего зарубежного опыта представляется создание систем совместного использования поверхностных и подземных вод, основанных на сооружении двух водозаборов, основного и компенсационного, эксплуатирующих только подземные воды.

При этом основные водозаборы инфильтрационного типа закладываются вдоль реки на грунтовые или тесно гидравлически связанные с рекой слабонапорные воды в гидрогеологических условиях, обеспечивающих наилучшие условия перехвата поверхностного стока. Такой водозабор работает с требуемой производительностью в течение многоводных периодов года с сокращением водоотбора (иногда до нуля в маловодные периоды). Второй – компенсационный водозабор включается только в маловодные периоды. Этот водозабор закладывается на грунтовые или, лучше, напорные воды с таким расчетом, чтобы ущерб поверхностному стоку при его эксплуатации не превысил, например 5% минимального среднемесячного стока 95% обеспеченности, то есть находился в пределах точности гидрологических измерений. Допустимость ущерба стоку в каждом конкретном случае может обосновываться отдельно.

Принципиальная схема такой системы изображена на рисунке 1.1.

При данной системе водоотбора практически вся отбираемая вода становится подземной, а привлекаемые поверхностные воды проходят частичную или достаточную самоочистку. В этом случае вода может прямо подаваться потребителям по трубопроводам.

Такие системы могут быть эффективными прежде всего в долинах незарегулированных рек.

В долинах зарегулированных рек водохранилищами повышение их водоотдачи может быть осуществлено созданием только компенсационных водозаборов. Последние также лучше всего закладывать на напор-

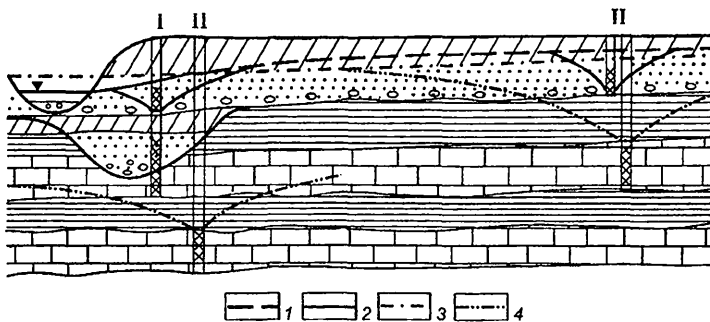


Рис. 1.1. Принципиальная схема системы совместного использования поверхностных и подземных вод

I – основной водозабор, перехватывающий поверхностный сток; II – варианты компенсационных водозаборов: 1 – уровни грунтовых вод в естественных условиях, 2 – уровни грунтовых вод в условиях эксплуатации, 3 – уровни напорных вод в естественных условиях, 4 – уровни напорных вод в условиях эксплуатации

ные воды в береговой зоне водохранилищ или каналов питьевого назначения, имеющих зоны санитарной охраны и контролируемое качество подаваемых потребителю поверхностных вод. Сброс откачиваемых подземных вод прямо в водохранилище или канал в таких условиях не приведет к ухудшению их качества и лишь улучшит его, а также одновременно позволит погасить дефициты в водном балансе водохранилищ в маловодные периоды.

Во всех случаях для всех водозаборов, закладываемых в долинах рек с неизбежным подсосом поверхностных вод, как правило, предусматривается минимальная водоочистка от бактериального загрязнения в виде хлорирования и система слежения за качеством подаваемой потребителю воды. При этом к качеству водоисточника, то есть к поверхностным и подземным водам, в таких случаях предъявляются практически одинаковые требования, а поэтому их смешение не должно вызывать каких-то особых сомнений и возражений.

Режим эксплуатации подземных вод компенсационными водозаборами в зависимости от принятой схемы совместного использования, а также в зависимости от периодичности возникающих дефицитов в воде может быть различным: а) в течение нескольких месяцев только в отдельные маловодные годы и б) ежегодно в течение нескольких месяцев в периоды межени и даже дважды в год в течение зимней и летней межени.

Наиболее эффективной, то есть с наибольшим коэффициентом использования водных ресурсов водозабора, как будет показано ниже, является ежегодная или практически ежегодная эксплуатация подземных вод.

Режим работы основного водозабора, наоборот, должен быть в многоводный период непрерывным с максимальной проектной производительностью. В маловодные периоды производительность основного водозабора должна либо сокращаться до пределов, обеспечивающих сохранение необходимого экологического стока в реке, либо снижаться до нуля.

В нашей стране подобных систем управления водными ресурсами пока нет. Однако отдельные методические аспекты проблемы совместного использования поверхностных и подземных вод неоднократно поднимались и рассматривались ранее [9, 23, 28, 31, 37, 41, 54, 85].

Научно-методическое обоснование надежного функционирования практически всех систем совместного использования поверхностных и подземных вод, как видно из вышеизложенного, складывается из шести основных блоков:

1. Исследование закономерностей чередования маловодных и многоводных периодов, установление зависимостей продолжительностей

маловодных периодов и дефицитов в них при среднегодовых значениях водности различной обеспеченности, выбор оптимальных обеспеченностей возможного водоотбора (с учетом вероятных продолжительности маловодий и глубины перебоев в них), оценку максимально возможных продолжительностей и объемов дефицита стока.

2. Расчет максимально возможных эксплуатационных запасов подземных вод для вероятных по продолжительности вариантов сработки резервных емкостных или естественных запасов водоносного горизонта в целях выбора оптимальной производительности водозабора и режимов его работы. Обоснование оптимизационных схем компенсационных водозаборов, обеспечивающих полное покрытие возникающих в маловодные периоды дефицитов стока.

3. Прогнозная оценка вариантов возможного и допустимого сокращения поверхностного стока при различной по интенсивности и продолжительности эксплуатации подземных вод и сопоставительный анализ ущербов стоку в процентах от поверхностного стока и водоотбора подземных вод как основы оценки эффективности функционирования системы совместного или комбинированного использования поверхностных и подземных вод.

4. Оценка гарантированности восполнения сработанных запасов подземных вод в сроки до вероятного появления очередного маловодного периода, т.е. до начала необходимой повторной сработки естественных запасов подземных вод. Обоснование обеспеченной восполнением оптимальной продолжительности и объемов эксплуатации подземных вод.

5. Обоснование экологических и других ограничений функционирования систем совместного использования поверхностных и подземных вод, в том числе критериев допустимого отъема поверхностного стока, требуемых экологических попусков и др.

6. Рассмотрение экономической эффективности систем совместного использования поверхностных и подземных вод как с точки зрения обоснования их преимуществ перед раздельным использованием поверхностных и подземных вод, так и с оценкой их окупаемости и экономической предпочтительности по сравнению с какими-либо другими альтернативными решениями проблем водоснабжения в регионе. Рассмотрение способов повышения отдачи водно-ресурсной системы в целом, включая искусственное восполнение подземных вод и др.

Только на основе этих шести блоков исследований можно строить модели управления водными ресурсами, определить стратегию их рационального использования, обосновать надежность функционирования таких систем.

Следует подчеркнуть, что большинство осуществлявшихся ранее исследований по проблеме не были выполнены в соответствующем объеме, а многие из этих блоков либо были просто опущены, либо приняты в виде каких-то условных допущений. В том числе и в функционирующих за рубежом системах в итоге, наряду с годами, когда потребность в воде покрывается полностью, встречаются периоды необеспеченные водой, т.е. надежность функционирования систем без должного научного обоснования не всегда гарантировалась.

Суммируя вышеизложенное, можно утверждать, что концепция наиболее эффективного и экономически обоснованного совместного или комбинированного использования поверхностных и подземных вод основывается на периодическом погашении дефицитов поверхностного стока в маловодные периоды за счет форсированного отбора подземных вод при условии гарантированности восполнения сбрасываемых запасов подземных вод до очередного маловодного периода и допустимых ущербах речному стоку и окружающей среде.

Необходимо отметить, что внедрение систем совместного или комбинированного использования подземных и поверхностных вод целесообразно далеко не во всех случаях. Среди критериев, предопределяющих необходимость создания таких систем, можно перечислить следующие:

1. Высокая сезонная и многолетняя неравномерность поверхностного стока с расходами рек в маловодные периоды не обеспечивающими существующую и тем более перспективную потребность региона в воде.

2. Нерациональность (по каким-либо причинам) регулирования стока водохранилищами или их малый активный объем, не позволяющий в полной мере использовать имеющиеся место водные ресурсы в среднемноголетнем их размере для удовлетворения требуемой потребности в воде.

Среди критериев, благоприятствующих созданию таких систем, можно назвать следующие:

- 1) Наличие водоносных горизонтов с геологическими запасами подземных вод, соизмеримыми и тем более превышающими возникающие дефициты в поверхностном стоке в маловодные периоды.

- 2) Достаточная изолированность водоносных горизонтов от рек, позволяющая исключить быстрое проявление ущербов стоку в периоды форсированной сработки запасов подземных вод.

- 3) Наличие в районе перспективных месторождений подземных вод, способных обеспечить население, помимо систем совместного использования вод, необходимым минимальным количеством воды питьевого назначения на случай катастрофических загрязнений поверхностных вод, если эту задачу нельзя решить за счет компенсационного водозабора.

Принимая во внимание перечисленные критерии к числу наиболее перспективных природно-техногенных условий, способствующих созданию систем совместного использования поверхностных и подземных вод, можно отнести следующие:

1. Долины малых зарегулированных и незарегулированных рек особенно в платформенных условиях, где помимо сравнительно широких аллювиальных террас и переуглубленных долин имеют место напорные воды, приуроченные к обширным артезианским бассейнам. Наиболее перспективным в этих условиях, является заложение водозаборов именно на напорные воды, обладающие затрудненной гидравлической связью с поверхностными водами, что позволяет исключить сколько-нибудь заметные ущербы стоку при эксплуатации подземных вод продолжительностью в несколько месяцев, а в отдельных случаях и в течение ряда лет. Подобные условия, например в бассейне Волги, могут быть найдены практически повсеместно, за исключением района Прикаспия (рис. 1.2). Даже исключив совсем малые реки с меженными расходами менее  $1 \text{ м}^3/\text{сек}$ , несмотря на схематичность карты, можно убедиться, что подобные условия в бассейне Волги развиты достаточно широко. Аналогичный вывод можно сделать и по другим районам страны.

2. Районы водохранилищ питьевого назначения. Дефициты в водном балансе таких водохранилищ могут покрываться форсированным отбором подземных вод из скважин, заложенных в непосредственной близости от водохранилищ, а откачиваемые воды сбрасываться прямо в водохранилище или канал, что значительно сокращает капитальные и эксплуатационные расходы по функционированию таких систем. Здесь также предпочтительно заложение скважин на напорные воды. Примером таких условий может служить Ивановское водохранилище, серия водохранилищ, входящих в Москворецкую систему водоснабжения Москвы (Можайское, Истринское, Рузское, Озернинское, Вазузское) и др.

Видоизменяя диспетчерские графики управления режимом функционирования водохранилищ, можно управлять и дефицитами поверхностного стока, то есть изменять и продолжительность маловодных серий и глубину перебоев стока и, в итоге, добиться тем самым наиболее полного использования водных ресурсов водосбора в целом.

И в первом и во втором случае имеются благоприятные условия для искусственного восполнения запасов подземных вод когда возникает сомнение или предполагается опасность в неполном восстановлении сработанных запасов подземных вод к очередному циклу их необходимого использования. Такое восполнение может быть организовано через поглощающие колодцы или нагнетательные скважины из специально

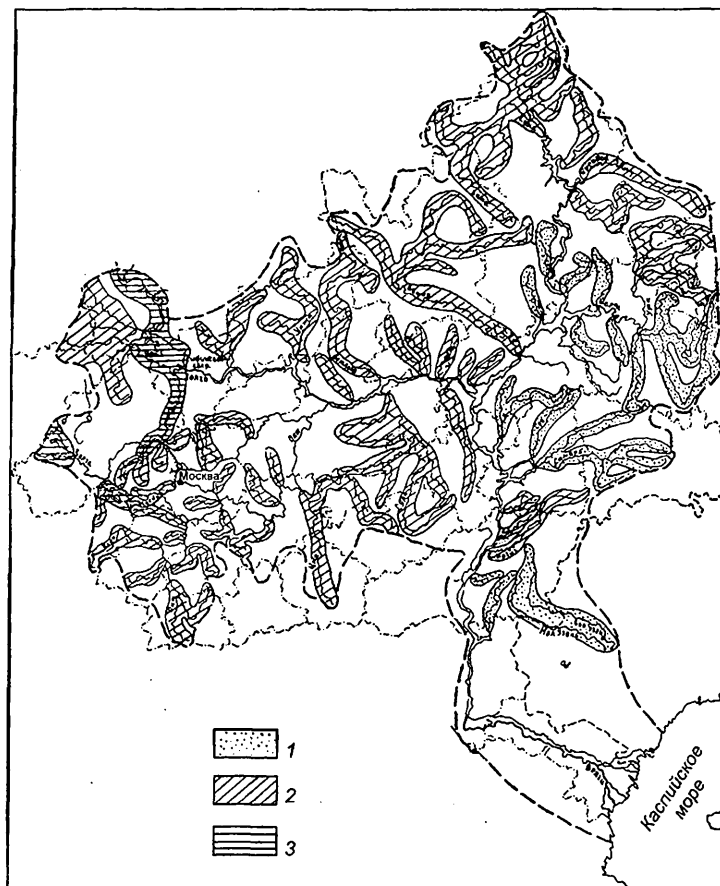


Рис. 1.2. Районы перспективные для создания систем совместного использования поверхностных и подземных вод в бассейне р. Волги

1 – долины малых рек с безнапорными и напорными водоносными горизонтами. Напорные воды отсутствуют или некондиционны по качеству; 2 – долины малых рек с безнапорными и напорными водами; 3 – долины малых рек, зарегулированные водохранилищами, а также долины с проточными озерами

созданных водоемов-отстойников с использованием воды как непосредственно из водохранилищ, так и из реки.

3. Действующие водозаборы на подземные воды, практически исчерпавшие свои эксплуатационные запасы. В стране сегодня имеется не мало

городов с водозаборами, понижения уровней в которых уже достигли предельных значений или находятся вблизи допустимых. К таким городам можно отнести Жуковский, Домодедово, Подольск, Чехов и многие другие. Обеспечение этих городов новым источником водоснабжения либо только планируется, либо уже решается. Консервация водозаборов приведет к подъему уровней подземных вод и на участке водозабора, и в зоне их влияния, что создает возможность для периодического их включения для покрытия дефицитов в отдельные маловодные периоды. Такой периодический водоотбор в первую очередь может как направляться на водоснабжение этих же городов с учетом существующей водопроводной сети, так и использоваться для погашения дефицитов в закольцованной межрайонной системы водоснабжения городских агломераций в целом.

4. Перспективным подобное комбинированное использование поверхностных и подземных вод может быть и в районах относительно богатых водными ресурсами, например, на орошаемых территориях в периодах резкого увеличения потребности в воде и, соответственно, водопотребления. В отличие от предыдущих вариантов, когда форсированная эксплуатация подземных вод используется для покрытия дефицитов в маловодные периоды, в этом случае, она используется для удовлетворения пиковых потребностей в воде в вегетативный период [37].

В качестве одного из часто встречаемых аргументов против систем совместного использования поверхностных и подземных вод приводится якобы экономическая нерациональность кратковременной эксплуатации водозаборов на подземные воды, работающих лишь по несколько месяцев в году и тем более только в отдельные маловодные годы. Ставится также под сомнение и техническая возможность периодической эксплуатации якобы способствующей заилению скважин, кольтатации и зарастанию их фильтров. Убедительным ответом на эти сомнения является существующая практика гидрогеологических работ. Многие подобные зарубежные системы функционируют в периодическом режиме уже долгие годы и это признано не только оправданным, но и единственно возможным. Опыт эксплуатации показал, что особенно долговечны скважины, заложенные на трещинно-поровые и закарстованные водоносные горизонты (известняки, мел, песчаники), не имеющие фильтров или оборудованные щелевыми фильтрами. Многие годы в сезонном периодическом режиме для целей орошения работают самоизливающие на краповом режиме скважины в Армении с фильтрами в базальтах и галечниках, а также скважины на насосном режиме эксплуатации в Киргизии и Узбекистане, заложенные в песчаных и гравийно-галечниковых водонос-



ных слоях. Более того, многочисленные наблюдательные скважины гидрорежимной службы страны, заложенные в различных гидрогеологических условиях, служат десятилетиями лишь при крайне редких (раз в 5–10 лет) и кратковременных (несколько часов) прокачках, осуществляемых с целью очистки отстойников от заилений. В случаях же, когда какой-либо другой альтернативной возможности обеспечить население питьевой водой в необходимом количестве нет, говорить об экономической целесообразности таких систем вообще не приходится. Тем не менее, обычно осуществляются экономические оценки любого водозабора, а альтернативные решения при этом сопоставляются.

Другим аргументом против совместного использования поверхностных и подземных вод часто служит мнение о нецелесообразности смешения качественных подземных вод с загрязненными или подверженными загрязнению поверхностных вод, т.е. аргумент против сброса откачиваемых подземных вод в реки и ухудшения тем самым их качества. Эту проблему можно решить с помощью создания систем из двух водозаборов (основного и компенсационного), закладываемых только на подземные воды, что обеспечивает самоочистку поверхностных вод и улучшения качества смешиваемых вод.

Суммируя вышеизложенное, можно заключить, что управляемые системы совместного использования поверхностных и подземных вод могут получить довольно широкое развитие в нашей стране и при должном комплексном обосновании надежности их функционирования могут, как будет показано ниже, увеличить производительность многих водозаборов в несколько раз, решив тем самым серьезные проблемы водоснабжения в регионах с напряженным водным балансом и снизив при этом многочисленные экологические риски.

---

## *Глава 2*

# **ЗАКОНОМЕРНОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОГО СТОКА. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТЕЙ ВОДООТБОРА**

Как уже неоднократно отмечалось ранее [26, 27], в многолетних колебаниях уровней и расходов подземных вод, а также в подземном стоке, фиксируемом главным образом в меженных зимних расходах рек, отмечается тенденция к цикличности. Более того, различными методами (автокорреляционным, спектральным и периодограммным анализом) не редко устанавливались статистически значимые циклы с преобладающими периодами в 2–3, 5–6, 11–12 и 24–25 лет. Однако даже визуально по наиболее продолжительным рядам наблюдений нетрудно убедиться, что все эти циклы не повторяются ни по амплитудам, ни по периодам, а проявляются незакономерно, как типичный случайный процесс. Все это не позволяет использовать данное явление прямо на детерминированной основе ни для прогнозов режима уровней и расходов подземных вод, ни для планирования рационального использования подземных вод и водных ресурсов в целом. Попытки составления долгосрочных прогнозов режима подземных вод, основанных на экстраполяции отдельных преобладающих циклов или сумм наиболее статистически значимых гармоник с наибольшими амплитудами, также не увенчались успехом, давая относительно достоверные результаты лишь при заблаговременности составления прогнозов в 1–2 года, т.е. в пределах инерционности системы, или ее «памяти» на предшествующие метеоусловия, хорошо описываемые марковскими цепями.

Вместе с тем, нельзя отрицать и не учитывать в практических расчетах существующих в стоке вообще и подземном стоке в частности

тенденций к случайным группировкам серий маловодных и многоводных лет.

Такое группирование серий заложено в самой природе формирования подземных вод, в их способности суммировать и отражать увлажненность, как правило, не одного текущего или прошедшего года, а серии предыдущих лет, что определяется малыми их скоростями фильтрации (до 10–100 см/сут). При этом чем больше инерционность водоносного горизонта, определяемая скоростями фильтрации подземных вод, протяженностью потока подземных вод и площадями водосбора, тем больший объем информации об увлажненности предыдущих лет отражается в его уровнях и расходах. Достаточно тесная связь с метеофакторами текущего или предыдущего года может быть отмечена лишь в открытом карсте в зоне активного водообмена при интенсивном и практически полном дренировании инфильтрующихся осадков ежегодно. Поэтому любые резкие изменения погодных условий отдельных лет в большинстве случаев сглаживаются в подземном стоке, что находит отражение в низких корреляционных связях хронологических рядов стока с атмосферными осадками, температурами воздуха и испарением. Подобная инерционность подземных вод в их реакции на случайные изменения погодных условий (например на засухи) определяет их преимущества как при самостоятельном их использовании для водоснабжения, так и в качестве компенсатора дефицитов в поверхностном стоке. Однако при этом необходимо учитывать закономерности вероятных чередований маловодных и многоводных серий, которые позволят обосновать и выбрать оптимальную или максимально возможную (с гарантией) продолжительность маловодного периода во время которого можно срабатывать имеющую место емкость водоносного горизонта или геологические (естественные) запасы подземных вод с уверенностью в том, что по истечении этого периода гарантированно наступит многоводная серия, во время которой произойдет полное восстановление работанных запасов подземных вод.

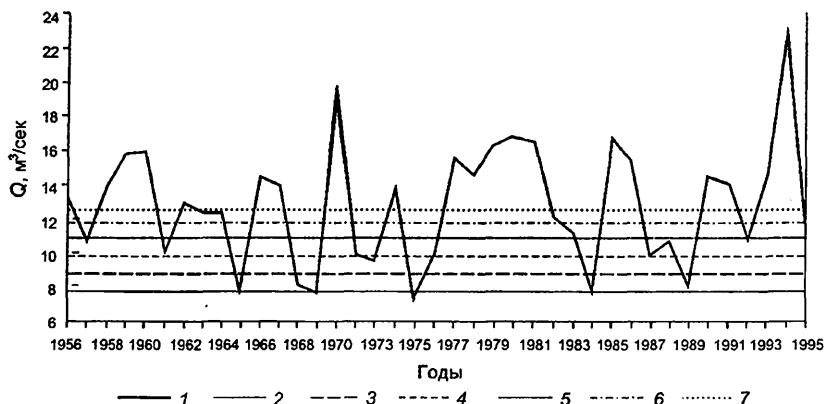
Учет продолжительности существующих серий маловодных и многоводных лет существенно влияет на определение всех трех основных составляющих эксплуатационных запасов подземных вод, определяющих возможную производительность водозаборов. Так, вполне очевидно, что доля участия естественных или геологических запасов в формировании эксплуатационных запасов водоносного горизонта зависит не только от размера емкости водоносного горизонта, но и от времени, за которое предполагается их сработать. Более того, если сработку емкостных запасов водоносных горизонтов планировать на весь период эксплуатации месторождения без учета изменчивости питания водоносного горизонта,

то величина окажется намного меньше, чем если период сработки выбирать лишь для необеспеченного восполнением маловодного периода в зависимости от конкретного распределения изменчивости восполнения естественных запасов подземных вод в сезонном (внутригодовом) и многолетнем разрезе. В результате, продолжительность периода сработки емкости горизонта значительно сокращается. В зависимости от выбора продолжительности сработки емкости водоносного горизонта величины эксплуатационных запасов подземных вод могут меняться в несколько раз, что будет видно ниже при рассмотрении конкретных примеров. Поэтому учет регулирующей емкости водоносного горизонта и продолжительности ее сработки является одним из основных условий возможного погашения дефицитов водных ресурсов в маловодные периоды.

Другое не менее важное условие – учет изменчивости естественных ресурсов или питания подземных вод, обеспечивающих естественным путем восполнение сработанной в маловодный период емкости горизонта. В связи с этим, при оценках естественных ресурсов или питания подземных вод следует оценивать не только их минимальную гарантированную величину, которая практически всегда может быть получена при эксплуатации водозабора, но также и возможное увеличение восполнения подземных вод в многоводные периоды в многолетнем или сезонном разрезе, которое может обеспечить полное восстановление сработанных емкостных запасов в маловодный период. Именно эти относимые обычно в «запас прочности» расчеты ресурсы подземных вод могут явиться дополнительным, часто ранее не учитываемым резервом при эксплуатации водозабора, что крайне важно в районах с напряженным водным балансом, так как восполнение запасов может определяться не минимальным, а среднегодовым питанием подземных вод.

Аналогичные вопросы возникают и при оценках привлекаемых ресурсов подземных вод. Однако в данном случае эти вопросы относятся уже к источнику восполнения, то есть к возможности восполнения сработанных запасов подземных вод за счет привлечения к водозабору поверхностного стока, так как основным источником восполнения запасов подземных вод в процессе их эксплуатации чаще всего служат именно фильтрационные потери из реки.

Исследования показали, что продолжительность мало- и многоводных серий зависит как от природных условий – климатических зон, литологии водовмещающих пород, глубин залегания подземных вод и др. [26, 27], так и от принимаемых проектных решений или от заданной расчетной обеспеченности среднегодового водоотбора. В последнем обстоятельстве не трудно убедиться, если многолетний график режима

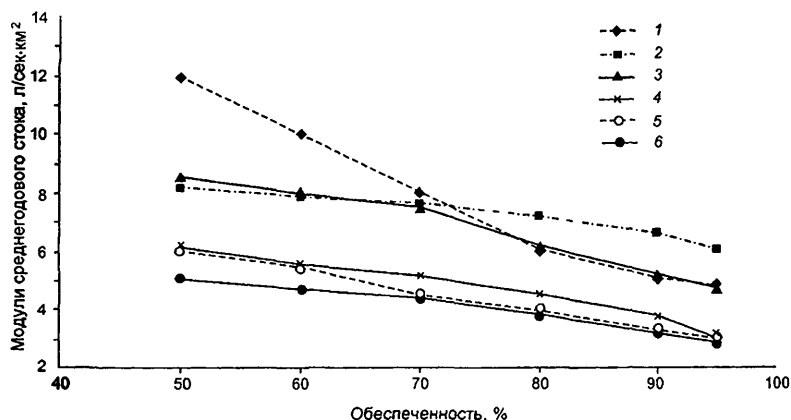


**Рис. 2.1. График режима поверхностного стока р.Осетр (пост Маркино) и значения различных уровней его обеспеченности**

1 — расходы поверхностного стока; 2–7 — обеспеченность (в процентах): 2 — 95, 3 — 90, 4 — 80, 5 — 70, 6 — 60, 7 — 50

поверхностного или подземного стока расчленить горизонтальными линиями, соответствующими величинам стока 50, 60, 70, 80, 90 и 95% обеспеченности. Как видно из такого графика (рис. 2.1) продолжительность и количество маловодных и многоводных серий прямо зависят от выбранной расчетной обеспеченности. При этом чем меньше принятая среднесуточная обеспеченность стока, т.е. чем меньше расчетная среднесуточная обеспеченность стока отклоняется от его среднесуточной нормы, тем более продолжительны маловодные серии, больше общее их число и возникают большие дефициты стока. Модули подземного и поверхностного стока также уменьшаются. И наоборот, с уменьшением расчетной обеспеченности растет абсолютная величина и модуль стока. Так, например, со снижением обеспеченности стока с 95 до 80% модуль стока, а следовательно и проектный водоотбор, могут возрасти в 1,5–2 раза, а в отдельных случаях в 3–5 раз (рис. 2.2).

Поэтому выбор расчетной обеспеченности стока, соответствующей стабильному во времени водоотбору, представляет собой важную оптимизационную задачу, т.к. с увеличением проектного водоотбора с соответствующим уменьшением обеспеченности стока неизбежно будут расти продолжительности маловодных серий и дефицитов в них, а следовательно снижаться гарантированность их восполнения.



**Рис. 2.2.** График зависимости модулей речного стока по ряду бассейнов Подмосквья от принятой расчетной обеспеченности  
 1 – р. Руза; 2 – р. Москва, Петрово-Дальнее; 3 – р. Катыш; 4 – р. Дубна; 5 – р. Нерская; 6 – р. Северка

Решение этой оптимизационной задачи может осуществляться на основе анализа достаточно продолжительных рядов фактических наблюдений за поверхностным стоком с ненарушенным режимом или по смоделированным рядам стока методом Монте-Карло.

Критерием оптимальности выбираемого проектного водоотбора может служить степень гарантированности его восполнения как основы надежности бесперебойного многолетнего функционирования всей системы. Поэтому под оптимальным водоотбором следует понимать такую обеспеченность его среднегодового за многолетие восполнения, обеспечиваемую поверхностным стоком, при которой после каждой маловодной серии последует многоводная серия, большая или равная по размерам восполнения и продолжительности, чем предшествующая маловодная.

Методологию выбора оптимальной обеспеченности лучше всего рассмотреть на конкретном примере. Для этого нами был выбран один из относительно продолжительных рядов наблюдений за поверхностным стоком в Подмоскowie.

Для выявления продолжительности серий различной степени водности многолетний график среднегодовых эмпирических значений стока разбивается, как уже указывалось выше, горизонтальными линиями,

соответствующими расходам 50, 60, 70, 80, 90 и 95% обеспеченности, определенных по графику обеспеченности. При необходимости разбивка графика может быть детализирована. Как видно из рисунка 2.1, горизонтальные линии выделили различные периоды или серии маловодных и многоводных лет различной продолжительности в зависимости от принятой расчетной обеспеченности. Для каждой из расчетных обеспеченностей определяется: общее количество маловодных серий или фаз в пределах всего ряда фактических наблюдений, продолжительность этих серий, кратных году, и их количество, а также количество и процентное значение маловодных фаз, обеспеченных восполнением, т.е. когда после каждой маловодной серии следует многоводная, равная или большая по водности предшествовавшей маловодной. За оптимальную принимается та минимальная обеспеченность, при которой во всех 100% случаев после каждой маловодной серии последовали многоводные серии с большими расходами, чем имел место дефицит восполнения в предшествующий маловодный период. Такое условие определяет возможность гарантированного восполнения естественным питанием работанных в маловодный период запасов подземных вод.

Пример такой оценки потенциальной гарантированности восполнения возникающих в маловодные периоды дефицитов за счет возможной сработки запасов подземных вод в долине р. Осетр приведен в таблице 2.1.

Возникающие в каждом из таких вариантов дефициты стока оцениваются по разности между среднемноголетним значением стока соответствующей оптимальной обеспеченности и среднегодовыми значениями

Таблица 2.1

**Зависимость количества и продолжительности маловодных серий, а также степени гарантированности восполнением подземных вод в бассейне р. Осетр от расчетной обеспеченности стока**

| Расчетная обеспеченность стока, % | Общее количество маловодных серий | Продолжительность маловодных серий (в годах) – числитель, количество серий данной продолжительности – знаменатель | Количество маловодных серий, обеспеченных восполнением, и их процентное выражение (в скобках) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 50                                | 9                                 | 1/3, 2/3, 3/3                                                                                                     | 4 (44,4%)                                                                                     |
| 60                                | 9                                 | 1/4, 2/4, 3/1                                                                                                     | 6 (66,6%)                                                                                     |
| 70                                | 7                                 | 1/2, 2/3, 3/1                                                                                                     | 7 (100%)                                                                                      |
| 80                                | 7                                 | 1/5, 2/2                                                                                                          | 7 (100%)                                                                                      |
| 90                                | 5                                 | 1/4, 2/1                                                                                                          | 5 (100%)                                                                                      |
| 95                                | 3                                 | 1/3                                                                                                               | 3 (100%)                                                                                      |

стока в маловодной серии, суммируемыми при продолжительности серии свыше одного года, соответственно за 2, 3 и т.д. лет. При этом следует отметить, что далеко не всегда суммарный дефицит стока в более продолжительной серии бывает больше, чем в менее продолжительной, что можно заметить на рисунке 2.1., сопоставив дефициты стока в 1968–1969 гг. и 1986–1989 гг.

По приведенному примеру расчета можно сделать следующие выводы:

1) гарантированным на 100% восполнением на участке гипотетического водозабора в бассейне реки Осетр может быть водоотбор, равный 70, 80, 90 и 95% обеспеченности подземного стока;

2) максимально возможным маловодным периодом при 70% будет трехлетний, при 80 и 90% – двухлетний, а при 95% обеспеченности – одноклетный;

3) дефициты стока с увеличением оптимальной обеспеченности, как правило, растут. Однако, до определенного момента они покрываются объемами последующих многоводных серий.

Поэтому оптимальной расчетной обеспеченностью по гарантированности восполнения дефицитов стока в данном случае может быть принята 70%. Выполненный расчет гарантированности восполнения позволяет дать одновременно и вероятностную оценку условий восполнения при любой расчетной обеспеченности. Как видно из приведенной таблицы, в основу расчета запасов подземных вод можно принять, к примеру, и расходы 60% обеспеченности. Однако при этом надо иметь в виду, что гарантированность восполнения этих запасов составит лишь 66,6%. Тем не менее, такие оценки могут быть также важны и необходимы в условиях дефицита воды, когда приходится рассчитывать не только на утвержденные по высоким категориям гарантированные запасы подземных вод, но и определить возможное сокращение водоподачи потребителям в отдельные маловодные годы или маловодные периоды года, что кстати предусматривается СНиПом [61].

Ближкие результаты получены и по другому водосбору Подмосковья – бассейну р. Нерская (рис.2.3). Здесь оптимальной обеспеченностью может быть принята 80% обеспеченность стока (табл.2.2). Водоотбор, соответствующий 70% обеспеченности стока, будет обеспечен восполнением здесь лишь в 50% маловодных серий. При обеспеченностях стока 90 и 95% продолжительность маловодных серий не превысит одного года.

Следует сразу подчеркнуть, что выполненная таким образом оценка оптимальной обеспеченности является предварительной и будет служить лишь основой для последующих вариантных решений.



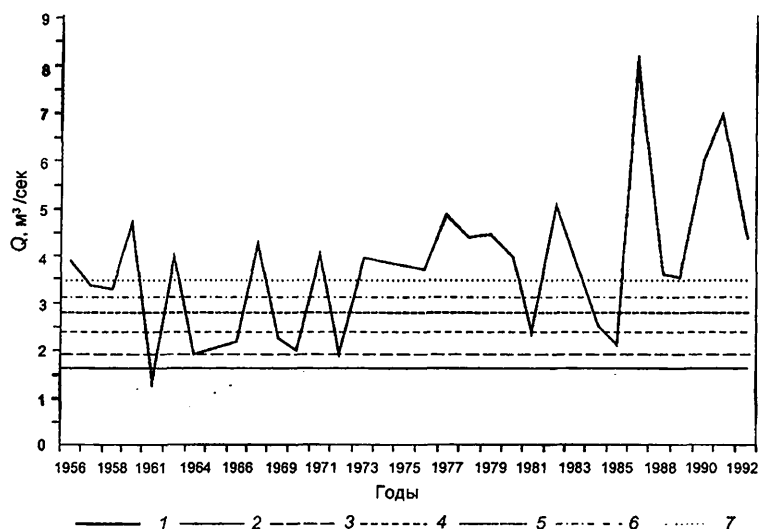


Рис. 2.3. График режима поверхностного стока р.Нерская

1 – расход стока; 2–7 – обеспеченность (в процентах): 2 – 95, 3 – 90, 4 – 80, 5 – 70, 6 – 60, 7 – 50

Таблица 2.2

Зависимость количества и продолжительности маловодных серий,  
а также гарантированности их восполнения  
от выбранной расчетной обеспеченности стока

| Расчетная<br>обеспечен-<br>ность<br>стока, % | Общее<br>количество<br>маловодных<br>серий | Продолжительность мало-<br>водных серий (в годах) –<br>числитель, количество<br>серий данной продол-<br>жительности – знаменатель | Количество маловодных<br>серий, обеспеченных<br>восполнением, и их<br>процентное выражение<br>(в скобках) |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 50                                           | 7                                          | 1/3, 2/1, 3/3                                                                                                                     |                                                                                                           |
| 60                                           | 6                                          | 1/3, 3/3                                                                                                                          |                                                                                                           |
| 70                                           | 6                                          | 1/3, 2/1, 3/2                                                                                                                     | 3 (50%)                                                                                                   |
| 80                                           | 5                                          | 1/3, 2/2, 3/1                                                                                                                     | 5 (100%)                                                                                                  |
| 90                                           | 2                                          | 1/2                                                                                                                               | 2 (100%)                                                                                                  |
| 95                                           | 1                                          | 1/1                                                                                                                               | 1 (100%)                                                                                                  |

В последних в зависимости от определяемых возможностей компенса-  
ции возникающих дефицитов в стоке за счет сработок запасов подзем-  
ных вод в течение 1, 2 или 3 лет, т.е. в зависимости от наличия достаточ-

ных для того запасов подземных вод и условий гарантированности восполнения сработанных запасов подземных вод до наступления очередного маловодного периода, оптимальная расчетная обеспеченность может быть повышена соответственно до 80, 90 или даже 95%.

Тем не менее в качестве первого шага процедуры оптимизации выбора проектного водоотбора в пределах конкретного водосборного бассейна основным критерием определения оптимальной обеспеченности может служить заданная степень возможной гарантированности восполнения сработанных в маловодный период естественных запасов подземных вод. За оптимальную обеспеченность при этом принимается минимальное из полученных значение расчетной обеспеченности подземного стока или уровней подземных вод, при которой после всех 100% вскрытых маловодных периодов последует многоводный период, соответствующей или большей продолжительности и объемам стока.

Для выбора оптимальной обеспеченности по эмпирическим рядам вполне очевидно, что необходимо иметь достаточно продолжительные ряды наблюдений (фактические или реконструированные тем или иным способом). Однако относительно достоверные результаты оценок могут быть получены и при длине ряда порядка 30–40 лет. При таких рядах имеется возможность проявиться практически всем наиболее характерным циклам или квазициклам, встречаемым в природных процессах в целом и в режиме поверхностного и подземного стока в частности. Подобный временной интервал используется и для определения климатических характеристик того или иного региона. Это позволяет рассматривать такие ряды относительно однородными по условиям формирования водных ресурсов по климатическим факторам. При более продолжительных рядах необходимо подтверждать стационарность как климатических характеристик, управляющих водным режимом, так и рядов поверхностного и подземного стока. На этом вопросе мы еще остановимся ниже.

Ряды поверхностного и соответственно подземного стока продолжительностью в 30–40 лет на сегодня для России не являются редкостью, что создает необходимую основу для подобного вида анализа практически повсеместно с использованием достаточно репрезентативных рядов фактических наблюдений.

Сопоставление оценок потенциальной гарантированности восполнения запасов подземных вод по соотношению продолжительностей маловодных и многоводных серий, а также по соотношению возникающих в маловодные периоды дефицитов и объемов стока в последующем многоводном периоде показало, что большая по продолжительности много-

водная серия как правило больше и по объему стока. Поэтому оптимальную обеспеченность можно в большинстве случаев (по крайней мере для предварительных оценок) осуществлять для простоты по соотношениям продолжительностей маловодных и многоводных серий. Для придания же расчетам большей убедительности такие сопоставления при решении конкретных практических задач уже лучше проводить и в том и в другом вариантах.

Аналогичным образом можно осуществить выбор оптимальной обеспеченности и по смоделированным методам Монте-Карло рядам среднегодовых значений стока. Преимуществом смоделированных рядов, как известно, является возможность сконструировать сколь угодно длинные ряды и тем самым получить вероятные маловодные серии даже самых чрезвычайно редко встречаемых обеспеченностей. Более того, условия моделирования могут быть с заданной степенью ужесточены с целью повышения надежности получаемого результата или создания определенного запаса прочности. Суть этого вопроса такова. Для выполнения вышеописанного графического анализа чередований серий различной водности и выбора оптимальной обеспеченности водоотбора практически невозможно рассматривать бесконечно длинные ряды.

Так, если теоретически можно рассчитать вероятность появления количества и продолжительности серий заданной обеспеченности, то оценить по таким рядам реальность чередований серий в отношении возникающих дефицитов стока в маловодных сериях и объектов стока в последующих за маловодными периодами многоводных сериях практически невозможно. В бесконечно длинном теоретическом ряду всегда можно будет найти серии значительной длины даже при достаточно высоком принимаемом на практике уровне обеспеченности стока, а также всегда можно будет встретить любое самое неблагоприятное группирование маловодных серий. Например, при 95% обеспеченности в каком-то выборочном 100-летнем ряду теоретически может быть встречена 5-летняя маловодная серия или 2 и 3-летние серии, разделенные однолетней многоводной. В 1000-летнем ряду соответственно могут быть встречены маловодные серии и много большей продолжительности при том же уровне значимости. В реальных же природных условиях, определяемых конкретными климатическими и гидрогеологическими особенностями территорий для года 95% обеспеченности, маловодные серии продолжительностью более одного года в прошедшем столетии не были встречены на всех проанализированных 217 водосборах России, то есть практически в любых существующих природных регионах Евразии. Поэтому расчетная обеспеченность стока, соответствующая 95% уровню превышения, мо-

жет быть принята как минимальная из оптимальных, так как с высокой степенью вероятности обеспечит маловодную серию продолжительностью не свыше одного года, исключит группирование маловодных серий и создаст условия для гарантированного ежегодного восполнения запасов подземных вод без чрезмерного ужесточения условий.

В любом случае при решении конкретных задач управления водными ресурсами приходится конструировать и анализировать какие-то выборочные прогнозные ряды продолжительностью в 25 или 50 лет. Подобная продолжительность выборочных рядов диктуется либо соответствующей необходимой заблаговременностью прогнозных оценок, либо расчетным сроком, на который осуществляется оценка запасов подземных вод, определяемым также чаще всего в 25 лет и реже в 50 лет, либо амортизированным сроком работы проектируемых водозаборов (обычно 25 лет), либо временем предполагаемой неизменности климатических условий. Поэтому для анализа приходится брать выборочные ряды, нарезанные из длинного модельного ряда. При этом возникает вопрос – какой из полученных многочисленных выборочных рядов следует принимать для анализа, какой из них можно признать средним многолетним, какой из них наиболее благоприятный или наоборот неблагоприятный. Анализ показал, что наиболее неблагоприятны с позиций стабильности водоснабжения во времени будут такие ряды, в которых встретилось наибольшее количество маловодных серий или маловодных серий наибольшей из возможных продолжительности. Такие ряды, как правило, имеют и меньшее выборочное среднемноголетнее значение стока по сравнению с среднемноголетним значением генеральной совокупности. Ранжирование выборочных среднемноголетних значений и оценка их обеспеченности позволяют задаваться необходимой обеспеченностью среднемноголетнего стока для теоретического определения оптимальной обеспеченности, создавая таким образом априори средние или наиболее жесткие условия для анализа чередований серий и в итоге оценить наиболее неблагоприятные ситуации по гарантированности восполнения сработанных запасов подземных вод, т.е. обеспечить надежность производимых расчетов. Выбранный таким способом выборочный модельный ряд анализируется аналогичным образом как и фактически наблюдаемый. Примеры таких рядов будут показаны ниже при рассмотрении условий формирования стока в конкретных водосборах.

Оценку вероятности появления количества и продолжительности серий маловодных и многоводных лет, как уже указывалось выше, можно осуществить и на основе вероятностных расчетов. Так, расчет количества возможных серий при слабой внутренней взаимосвязанности

членов ряда (при  $R_r < 0,25$ ) можно произвести по известной в статистике формуле:

$$\tau_m = \left( P + \frac{1}{n} \right) \cdot \frac{C_{n-m-1}^{np-1}}{C_n^{np}}, \quad (2.1)$$

где  $\tau_m$  – доля каждой серии маловодных лет в выборке, в долях единицы;  $P$  – обеспеченность для определения маловодных серий;  $(1-P)$  – обеспеченность для определения многоводных серий;  $n$  – количество членов в выборке;  $m$  – длительность серий, в годах.

$$C_X^Y - \text{сочетания из } Y \text{ элементов по } X = \frac{X!}{Y! \cdot (X-Y)!}.$$

В качестве примера можно привести выполненный Г.Н. Семькиной расчет количества серий маловодных лет в выборке из 50 членов относительно обеспеченности 70% (или в долях единицы – 0,7). Доля серий длительностью в 1 год ( $m=1$ ) в выборке составит

$$\tau_{m=1} = \left( 0,7 + \frac{1}{50} \right) \cdot \frac{C_{50-1-1}^{35-1}}{C_{50}^{35}} = 0,72 \cdot \frac{48! \cdot 35! \cdot 15!}{34! \cdot 14! \cdot 50!} = 0,154.$$

Отсюда количество серий ( $\Theta$ ) маловодных лет длительностью в 1 год составляет  $\Theta_{m=1} = \tau_{m=1} \cdot n = 0,154 \cdot 50 = 7,7$  раза.

Аналогичным образом получается, что:

при  $m = 2$

$$\tau_{m=2} = \left( 0,7 + \frac{1}{50} \right) \cdot \frac{C_{50-2-1}^{35-1}}{C_{50}^{35}} = 0,045, \quad \Theta_{m=2} = 0,045 \cdot 50 = 2,25 \text{ раза};$$

при  $m = 3$

$$\tau_{m=3} = \left( 0,7 + \frac{1}{50} \right) \cdot \frac{C_{50-3-1}^{35-1}}{C_{50}^{35}} = 1,24 \cdot 10^{-2}, \quad \Theta_{m=3} = 1,24 \cdot 10^{-2} \cdot 50 = 0,62 \text{ раза};$$

при  $m = 4$

$$\tau_{m=4} = \left( 0,7 + \frac{1}{50} \right) \cdot \frac{C_{50-4-1}^{35-1}}{C_{50}^{35}} = 3,2 \cdot 10^{-3}, \quad \Theta_{m=4} = 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 0,16 \text{ раза}.$$

Вероятность появления в выборке из 50 членов более длительных маловодных серий ( $m = 5, 6, 7, 8, \dots$ ) крайне мала, в связи с чем для практи-

ческих целей подсчет можно ограничить определением количества трехлетних серий. Подобная оценка производится и для подсчета многоводных серий, но по отношению к обеспеченности, выраженной в долях от единицы  $(1-P)$ .

Вероятностная оценка оптимальной обеспеченности производится подсчетом вероятности события также из предположения о том, что за каждой маловодной серией последует более длительная или равная по продолжительности серия многоводных лет с использованием эмпирически оцененного количества многоводных и маловодных периодов в рядах наблюдений за поверхностным или подземным стоком. Данная оценка производится отдельно для квантилей обеспеченности 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9. Используя теорему умножения вероятностей, для каждого квантиля подсчитывается произведение вероятности появления каждого конкретного числа и длины серии маловодных лет с учетом полученных различных величин многоводных серий. Это произведение вероятностей и отражает суммарную вероятность гарантированности восполнения запасов подземных вод, оцененную по формуле:

$$P = \frac{n_1}{n_{\text{общ.}}} \cdot \frac{n_2}{n_{\text{общ.}}} \cdot \dots \cdot \frac{n_i}{n_{\text{общ.}}},$$

где  $n_1, n_2 \dots n_i$  – число маловодных серий длиной  $m$  лет, обеспеченных восполнением;  $n_{\text{общ.}}$  – общее количество маловодных серий.

Сопоставление результатов анализов по выбору оптимальных обеспеченностей восполнения запасов подземных вод по эмпирическим рядам и вероятностным путем показало в ряде случаев хорошую их сходимость, особенно для рядов со значительной ( $>40$  лет) продолжительностью наблюдений. В большей части других случаев вероятностные расчеты оказались более «жесткими», снизив расчетную оптимальную обеспеченность на 5–10% по сравнению с эмпирической оценкой. Это вполне объяснимо, так как при переборе различных сочетаний в теоретических расчетах предусматривается, как уже отмечалось выше, возможность и того, что, например, все 5 маловодных лет из 100 при 95% обеспеченности могут встретиться подряд, чего в природных рядах не наблюдается. Кроме того, как видно из примера чисто вероятного расчета, на его результаты никак не влияет природная среда изучаемого водосбора (климатическая зона, геологическое строение, орография, степень инерционности водоносного горизонта и т.д.). Так, при одинаковой длине ряда результаты оценок для водосборов в тундре, пустыне, тропиках, в карсте и морене будут одинаковыми, что трудно себе представить. По-

этому выбор оптимальных обеспеченностей водоотбора и восполнения запасов подземных вод лучше производить либо по анализу эмпирических рядов наблюдений, либо по смоделированным рядам, в статистических параметрах которых косвенно заложены различия природных сред.

Вскрытые закономерности чередований маловодных и многоводных лет могут с успехом использоваться для планирования совместной эксплуатации поверхностных и подземных вод. В этом случае водоотбор может быть определен равным среднегодовому расходу соответствующей обеспеченности, а внутригодовое распределение стока может не учитываться особенно при кратковременном (1–2 месяца) паводковом периоде. Не учет последнего лишь создаст дополнительный резерв в срабатываемых запасах подземных вод и повысит надежность функционирования системы.

Вместе с тем необходимо отдавать себе отчет в том, что даже в самый маловодный год минимум 1–2 месяца в паводок дефицитов стока не возникает. Во многих случаях при малых расчетных среднегодовых обеспеченностях стока маловодными могут оказаться вообще лишь несколько дефицитных месяцев. Это обстоятельство резко увеличивает возможности совместного использования поверхностных и подземных вод, так как позволяет планировать сработку запасов подземных вод за более короткий промежуток времени и тем самым резко увеличить производительность компенсационных водозаборов, создать при этом лучшие условия для гарантированного восполнения запасов подземных вод и обеспечить возможность ежегодного включения компенсационных водозаборов, то есть использовать их более эффективно.

В этой связи учет внутригодового распределения стока становится особенно рациональным.

В таких случаях анализ закономерностей чередований серий, их продолжительность и глубину перебоев, а также выбор оптимальной обеспеченности стока следует проводить по рядам, составленным из среднемесячных за многолетие значений. Для примера приведем графики режима уровней грунтовых вод по одной из скважин Подмосковья (рис. 2.4).

Как видно из данного графика, реальная продолжительность маловодных периодов, во время которых придется ориентироваться на подземные воды, при этом сокращается, т.к. ежегодно в паводковые периоды имеет место восполнение водных ресурсов. Однако количество маловодных периодов, когда могут потребоваться подземные воды, также возрастает, что требует учета.

Как видно из рисунка 2.4 при уровнях 95% обеспеченности на графике среднегодовых значений ( $\alpha$ ) возникает лишь два маловодных периода

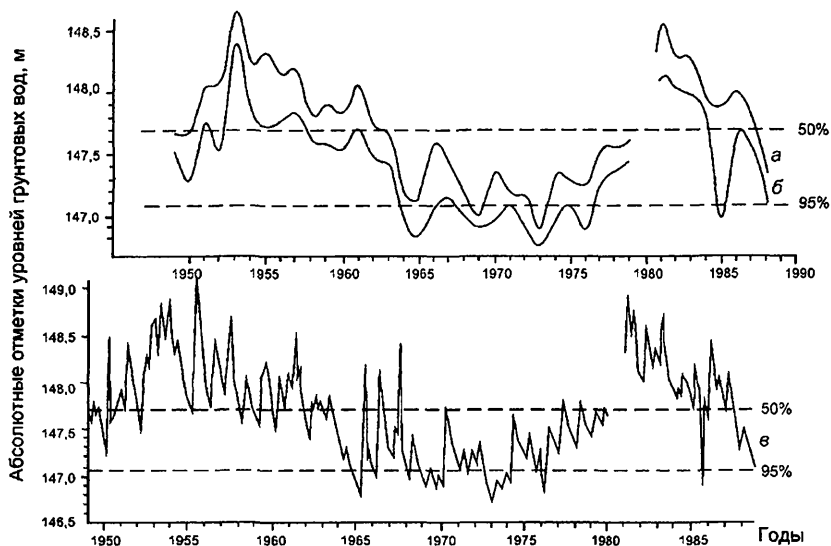


Рис. 2.4. Графики режима уровней грунтовых вод по скв. 19 (Щемилово), построенные по среднегодовым (а), меженным зимним среднемесячным (б) и среднемесячным (в) значениям

годовой продолжительности при высокой гарантированности полного восполнения возникающих дефицитов в запасах подземных вод, т.е. со значительным превышением продолжительности многоводных периодов по сравнению с предшествовавшими маловодными.

На графике, составленном из минимальных годовых среднемесячных значений (б), маловодных серий при той же обеспеченности становится уже 5, и их продолжительность возрастает до 2-х и даже 3-х лет, при гарантированном восполнении лишь годовичных маловодных периодов. На графике, составленном из всех внутригодовых среднемесячных значений (в), маловодных периодов при той же 95% обеспеченности уровней становится уже 8. При этом 6 из них продолжительностью от 1 до 7 месяцев полностью обеспечены восполнением, а два периода продолжительностью 5 и 13 месяцев восполнением не обеспечены.

Таким образом, аналогичный анализ среднемесячных значений уровней и расходов подземных вод дает более реальную информацию как по числу и продолжительностям маловодных серий, так и по возникающим в них дефицитам и гарантированности их погашения, что позволяет рас-



смагивать подобный анализ как наиболее реально отражающий особенности многолетней изменчивости как поверхностных, так и подземных вод.

Возможно графики, построенные по среднедекадным значениям, дали бы еще более точную информацию. Однако повышение точности таких оценок за счет их дискретности вряд ли будет оправданным, принимая во внимание трудности в сборе соответствующих исходных данных, обычно не публикуемых. Тем не менее, этот вопрос требует дополнительного изучения.

Для выявления зависимостей, возникающих в маловодные периоды, дефицитов ресурсов подземных вод от продолжительности этих периодов использовались также данные внутригодового распределения уровней грунтовых вод. Для этого графики многолетних колебаний уровней грунтовых вод разбивались аналогично рисункам 2.1 и 2.3 горизонтальными линиями, соответствующими среднемесячным уровням 95 и 90% обеспеченности. Образованные таким образом маловодные серии использовались для определения дефицитов питания подземных вод в них. Последние считались как разность фактических значений уровней и средне-многолетнего уровня заданной обеспеченности, выраженные в миллиметрах слоя воды (то есть как произведение  $\Delta h$  уровня на водоотдачу водовмещающих пород). Характер зависимости объемов дефицитов питания подземных вод от продолжительности маловодных периодов приведен на рисунке 2.5. Как видно из рисунка, эта зависимость для наиболее часто встречаемых оптимальных расчетных обеспеченностей близка к прямолинейной, то есть чем продолжительней маловодная серия, тем выше дефицит питания в ней. Кроме того, чем выше задаваемая обеспеченность уровней, тем меньше возможный диапазон изменений дефицитов и меньше их объемы. Следует также отметить, что при уменьшении уровня обеспеченности с 95% до 90% количество маловодных серий, как было показано выше, растет. В число маловодных дополнительно попадают новые маловодные серии с более высокими отметками, обладающие меньшей степенью маловодности и соответственно меньшими дефицитами. Такие случаи зафиксированы на графиках в виде отдельных точек, не лежащих на общие графики связи. Учитывая же то, что дефициты питания подземных вод в таких маловодных периодах существенно меньше, чем в основной группе серий той же продолжительности, такими значениями можно пренебрегать, так как расчет сработки запасов подземных вод осуществляется с гарантией по наиболее продолжительным сериям и с учетом наиболее глубоких перебоев (дефицита) стока.

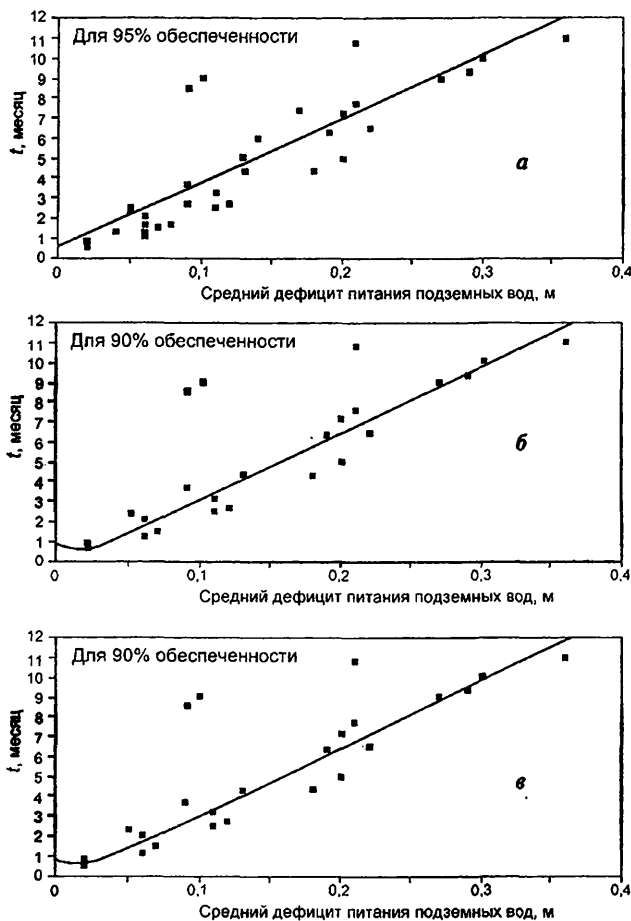


Рис. 2.5. Графики зависимости средних дефицитов питания подземных вод от продолжительности внутригодовых маловодных периодов различной обеспеченности  
а - 95%; б - 90%; в - 80%

Для получения представлений о региональных закономерностях проявлений маловодных серий и оптимальных обеспеченностей в подземном стоке были проанализированы данные многолетних наблюдений по 217 гидрогеологическим постам России, расположенным в различных климатических, орографических, геологических и гидрогеологических условиях [27].

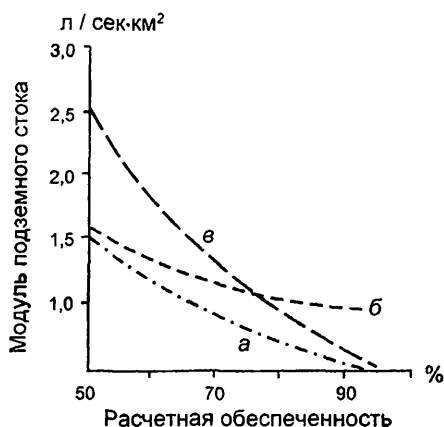
Большая часть проанализированных рядов наблюдений характеризуется естественными или слабонарушенными условиями формирования стока, а также сравнительно небольшими водосборными площадями (от 300 км<sup>2</sup> до 30 тыс. км<sup>2</sup>).

По каждому из таких рядов были построены хронологические графики, графики обеспеченности и описанным выше способом произведены определения количества и продолжительности маловодных серий при разных уровнях обеспеченности, а также определена оптимальная обеспеченность.

Обобщая результаты этого анализа, можно сформулировать следующие установленные пространственно-временные закономерности проявлений маловодных и многоводных периодов:

1. Общее количество маловодных серий при уменьшении расчетной обеспеченности от 95% до 50%, как правило, закономерно увеличивается, продолжительность серий также растет. Одновременно растут и модули подземного стока (рис.2.6). Эта закономерность хорошо иллюстрируется приведенными выше таблицами 2.1, 2.2 и рисунками 2.1 и 2.3.

2. Наиболее часто встречаемыми маловодными сериями уже при 90% обеспеченности являются преимущественно однолетние (рис.2.7), а при 95% обеспеченности более продолжительных серий чем однолетние не встречено вообще.



**Рис. 2.6.** Зависимости модулей подземного стока от заданной расчетной обеспеченности  
Водосборы: а - р. Вента, б - р. Неман, в - р. Преголя

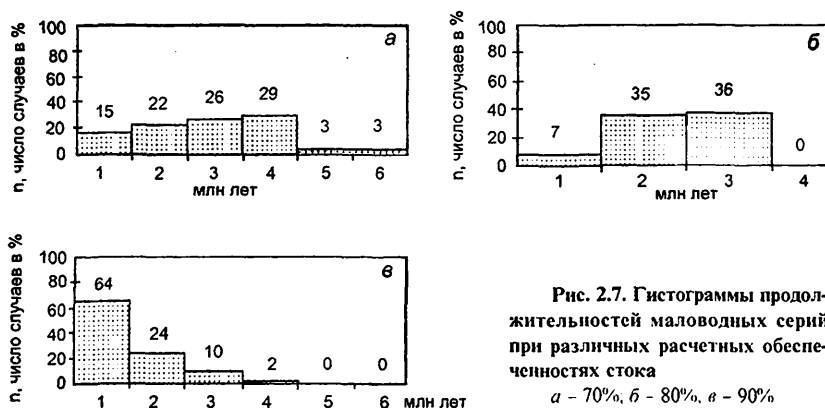


Рис. 2.7. Гистограммы продолжительностей маловодных серий при различных расчетных обеспеченностях стока

а – 70%, б – 80%, в – 90%

Вероятность появления многоводных серий уменьшается с увеличением их продолжительности. В каждом конкретном случае можно установить вероятность максимально возможной продолжительности маловодной серии.

3. Не установлено каких-либо определенных взаимосвязей между продолжительностью серий и площадями водосборов. Обратная связь между степенью дренированности водосборов и продолжительностью маловодных серий прослеживается по всем квантилям обеспеченности особенно заметно по числу 1–2-летних серий.

4. Сопоставление теоретических и эмпирических оценок показало слабую зависимость их результатов от длины анализируемого ряда. Отмечена лишь общая тенденция повышения вероятности появления продолжительных серий с увеличением длины ряда. Однако сопоставимые оценки ( $\pm 10\%$ ) получаются при длине ряда свыше 25 лет практически независимо от их длины.

5. Отмечена тенденция к увеличению числа длиннопериодичных серий и сокращению числа короткопериодных серий в аридных районах по сравнению с гумидными районами при тех же уровнях обеспеченности (рис. 2.8), что связано с увеличением средних глубин залегания грунтовых вод с севера на юг и увеличением степени инерционности подземных вод.

6. Наиболее частными оптимальными обеспеченностями подземного стока, гарантированными восполнением по эмпирическим оценкам оказались 80%, а по теоретическим расчетам – 90% (рис. 2.9).

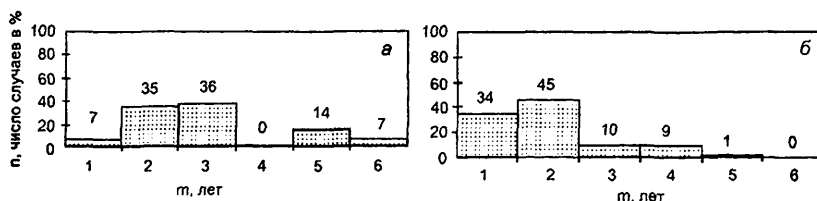


Рис. 2.8. Гистограммы продолжительности маловодных серий для различных расчетных обеспеченностей в аридной (а) и гумидной (б) областях

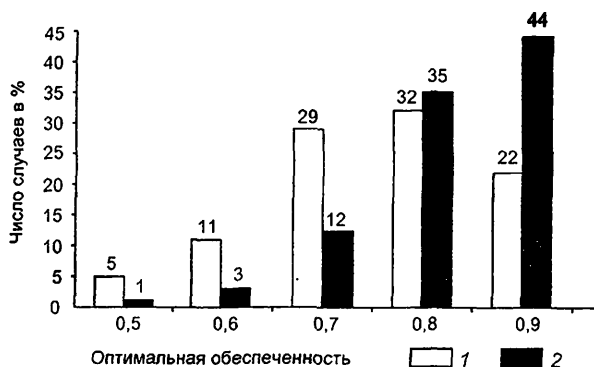


Рис. 2.9. Гистограмма частот и процент встречаемых оптимальных обеспеченностей на территории бывшего СССР, полученных по эмпирическим (ряд 1) и теоретическим (ряд 2) оценкам

Оценки: 1 - эмпирические, 2 - теоретические

7. Установлены на уровне слабых тенденций обратные связи полученных оптимальных расчетных обеспеченностей стока с коэффициентами вариации рядов ( $C_v$ ), фильтрационными свойствами водовмещающих пород и прямые связи со степенью внутрирядной связанности (автокоррелированности  $R_p$ ) рядов.

8. Отмечается зависимость распределения оптимальных обеспеченностей от геологического и тектонического строения территории. В том числе отмечено снижение оптимальных обеспеченностей в горно-складчатых областях и превышение их в платформенных условиях.

Наиболее существенные увеличения модулей подземного стока при снижении расчетной обеспеченности отмечаются в трещинно-карстовых водоносных горизонтах.

Обобщая все эти закономерности, можно заключить, что наибольший выигрыш от внедрения систем совместного использования поверхностных и подземных вод можно получить в наименее инерционных водоносных горизонтах и в гумидных зонах. Однако это не исключает их использования и в других природных условиях.

Установленные закономерности позволяют наметить рациональные пути исследований, направленных на выработку стратегии комплексного использования поверхностных и подземных вод, на выбор форм оптимального управления водными ресурсами в целом с учетом факторов, способствовавших повышению коэффициента использования водных ресурсов.

Одним из наиболее сложных и дискуссионных вопросов в методологии анализа временных закономерностей многолетней изменчивости поверхностного и подземного стока, прогноза и моделирования таких временных рядов является учет их нестационарности. Визуальное рассмотрение многочисленных наиболее длинных (более 40 лет) рядов наблюдений за подземным стоком часто указывает на наличие в их структуре линейных и нелинейных трендов. Так, из 46 рядов наблюдений по малым и средним водосборам в бассейне р. Волги в 38 случаях были отмечены тенденции к увеличению подземного стока (рис. 2.10). В 14 случаях явных трендов не прослеживается и лишь в одном случае, в верховьях Камы, отмечена тенденция к снижению подземного стока. При этом примерно в половине случаев положительные тренды проявились уже в течение нескольких десятилетий, а в ряде других – лишь в последние годы. Коэффициенты корреляции трендов варьируются от статистически незначимых до 0,4–0,5, а в отдельных случаях даже до 0,7–0,86, что не позволяет усомниться в наличии трендов и их статистической значимости.

Причины появления трендов во многих случаях достоверно не определены и могут быть разнообразными по генезису. Широкая региональная распространенность положительных трендов может быть вызвана отмечаемыми климатологами техногенными трансформациями климата, проявляющимися как в повышении глобальных температур воздуха, так и в изменениях атмосферных осадков. В частности, в области питания бассейна Волги в ближайшие десятилетия прогнозируется рост атмосферных осадков [7, 8, 52], что уже подтверждается метеоданными, отмечающими увеличение атмосферных осадков с градиентами трендов до 3–6 мм/год. Не исключен и антропогенный характер трендов. В том числе положительные тренды в поверхностных и подземных водах могут быть связаны с ростом водопотребления и орошения, т.е. с переводом части поверхностных вод в подземные и наоборот, при сбросе в реки возврат-

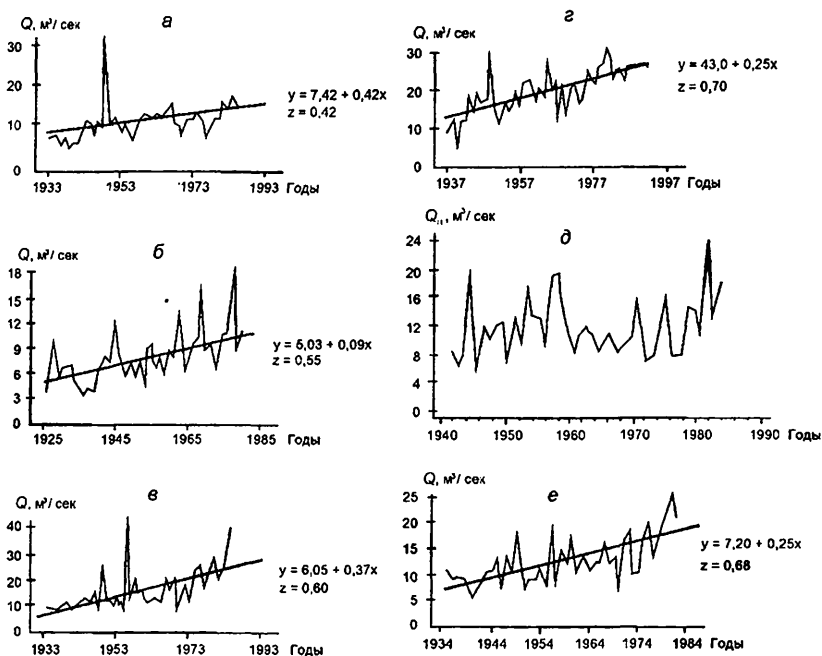


Рис. 2.10. Многолетняя изменчивость межennых зимних расходов подземного стока по некоторым водосборам бассейна р. Волги

а – Самара; б – Быстрица; в – Цна; г – Сура; д – Кострома; е – Мокша

ных вод при эксплуатации напорных водоносных горизонтов, а отрицательных трендов – с мелиорацией заболоченных территорий и перехватом стока инфильтрационными водозаборами.

В любом случае, независимо от генезиса трендов, их наличия, тем более в случаях их статистической значимости, не замечать и не учитывать этого явления нельзя.

Так, например, при оценках потенциальных эксплуатационных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод одним из лимитирующих факторов, как уже отмечалось выше, являются значения минимального 30-дневного стока 95% обеспеченности. Подобные минимальные значения стока отмечались во многих случаях лишь в начале столетия. Во все последующие десятилетия минимальный сток неизменно превы-

шал в несколько раз такой сток, и это превышение постоянно нарастает. Поэтому ориентируясь формально на минимальный сток 95% обеспеченности, можно неизбежно занизить также в несколько раз реальные сформировавшиеся на сегодня ресурсы и запасы подземных вод.

В зависимости от величины градиента тренда и степени его значимости, а также от характера решаемой практической задачи, учет тренда может быть осуществлен в различных вариантах:

а) При значимом тренде можно его выделить и экстраполировать на срок необходимый для расчетов. Для получения вероятных сезонных и многолетних отклонений уровней или расходов стока относительно тренда по эмпирическому ряду конструируется новый ряд отклонений от тренда и по параметрам этого нового ряда ( $\bar{Q}$ ,  $\sigma$ ,  $C_s$ ,  $C_r$ ,  $R_r$ ) моделируется методом Монте-Карло прогнозный ряд, который затем анализируется обычным образом. Пример такого анализа будет приведен ниже.

Для учета возможной изменчивости расчетных параметров во времени эмпирический ряд может быть разбит на 2–3 интервала. По каждому из них определяются эти параметры, устанавливается закономерность их изменчивости в зависимости от времени, которая затем учитывается в прогнозном ряду.

Данная модель анализа и прогноза предусматривает сохранение тренда в будущем. Физическим обоснованием такой модели может служить признание достаточно продолжительных во времени климатических изменений, значительно превосходящих прогнозный срок решаемой практической задачи.

б) При наличии предпосылок, затрудняющих обоснованность экстраполяции трендов в будущее, например, если факторы, обусловившие тренд, уже сработали (например, завершение мероприятий, изменивших водохозяйственный баланс территорий, в том числе проведенные мелиоративные работы, зарегулирование стока и обводнения территории и т.п.), а также при допущении, что формирование водных ресурсов будет осуществляться в будущем при каких-то новых сформировавшихся на сегодня необратимых природно-техногенных условиях, прогнозный ряд может конструироваться от конечного относительно стационарного наблюдаемого ряда. В качестве расчетных параметров прогнозного ряда в этом случае могут быть приняты: норма стока в конечном периоде наблюдений, а параметры изменчивости ( $\sigma$ ,  $C_s$ ,  $C_r/C_s$ ) и взаимосвязанности членов ряда ( $R_r$ ) – на конечном этапе наблюдений. В отличие от предыдущего варианта в данном случае конструируется стационарный ряд.

в) Несмотря на наличие тренда, а тем более при статистически незначимых трендах, эмпирический ряд признается стационарным. При этом



предполагается, что наблюдавшиеся даже в течение весьма длительных периодов времени направленные тенденции в уровнях и расходах подземных вод или поверхностного стока являются ветвями каких-то долгопериодных природных циклических колебаний. В этом случае наблюдающийся тренд со временем, достигнув своего экстремума неизбежно сменится тенденцией противоположной направленности. Поэтому прогнозный ряд может конструироваться по параметрам, полученным по фактическому ряду наблюдений.

Определение оптимальной обеспеченности осуществляется однотипно по каждому из смоделированных таким образом рядов. Примеры конструирования таких конкретных рядов и особенности их анализа будут рассмотрены ниже.

Рассмотренные закономерности формирования чередований серий различной водности позволяют сделать ряд практических выводов по методологии выбора оптимальных обеспеченностей, оценок продолжительностей маловодных серий и возникающих в них дефицитов водных ресурсов. В частности, можно заключить, что:

1. Анализ закономерностей чередования маловодных и многоводных лет показал принципиальную возможность понижения расчетной обеспеченности (в отдельных случаях с 95 до 80% обеспеченности) с одновременным увеличением отдачи водноресурсной системы в несколько раз и гарантией восполнения запасов подземных вод до очередного маловодного периода.

2. Эмпирические и особенно сравнительно продолжительные (>40 лет) ряды наблюдений могут давать достаточно надежные представления о характере чередований маловодных и многоводных периодов более близкие к реальным природным условиям, чем теоретические расчеты, создающие не редко чрезмерно жесткие крайне маловероятные ситуации, не подтверждаемые реальными даже наиболее продолжительными наблюдениями. Поэтому принимая во внимание, прежде всего это обстоятельство, а также трудоемкость теоретических оценок, для анализа продолжительностей маловодных серий и дефицитов стока в них можно использовать эмпирические ряды, что может существенно повысить эффективность систем совместного использования поверхностных и подземных вод.

3. Наличие существенной внутригодовой изменчивости стока позволяет считать наиболее эффективным базирование управления использованием водных ресурсов с учетом прежде всего внутригодовых дефицитов стока. Для установления вероятных продолжительностей маловодных периодов необходимо отдавать предпочтение рядам наблюдений,

построенным, по-возможности, с наибольшей дискретностью замеров. Оптимальной, по-видимому, может быть принята среднемесячная дискретность построения графиков.

При 95% обеспеченностях маловодные серии продолжительностью свыше 1 года не встречались. Это позволяет осуществлять включение компенсационных водозаборов ежегодно.

Отсутствие четкой цикличности и других детерминированных составляющих в поверхностном и подземном стоке позволяют рассматривать появление маловодных и многоводных серий как случайный процесс.

4. Для оценки степени гарантированности восполнения периодически срабатываемых запасов подземных вод необходимо учитывать не только продолжительность, но и глубину перебоев, а также объемы стока многоводных серий, следующих за маловодными периодами. Несмотря на то, что продолжительности маловодных серий оптимальных обеспеченностей и объемы дефицитов в них тесно взаимосвязаны, подобные оценки следует делать одновременно. При этом под выбираемой расчетной оптимальной обеспеченностью понимается такая, при которой после каждой маловодной серии последует более многоводная прежде всего по объемам стока.

5. Наличие в отдельных случаях достаточно существенных трендов в поверхностном и подземном стоке существенно искажают представления о реальных значениях стока в периоды маловодных серий, что обязывает учитывать это явление или в противном случае обосновывать возможность их неучета (т.е. несущественности возможных ошибок, связанных с неучетом трендов) для решаемых конкретных задач.

6. Несмотря на то, что большая часть установленных закономерностей формирования серий различной водности свидетельствует о их климатическом генезисе, ряд закономерностей указывает также на значимость в этом процессе геологической среды и в том числе фильтрационных свойств водовмещающих пород и пород зоны аэрации, определяющих модули поверхностного и подземного стока, степень инерционности последнего.

Все это обязывает осуществлять рассмотренный выше анализ рядов с учетом гидрогеологических особенностей территорий, т.е. отдельно для различных гидрогеологических районов, а также с учетом, где это необходимо, статистических параметров рядов, косвенно отражающих особенности геологической среды.

7. Для осуществления вариантных расчетов, а также для придания их результатам заданного уровня надежности, в особенно ответственных случаях, анализ продолжительностей маловодных серий лучше всего осу-

ществлять по смоделированным рядам, обеспечивающим наиболее жесткие условия возможной изменчивости стока. Моделирование рядов лучше осуществлять с учетом динамико-стохастической природы формирования стока, что позволит сконструировать многолетние непрерывные ряды с внутригодовым распределением стока. Принципиальная методика моделирования таких рядов рассматривается в следующей главе.

Таким образом исследованные закономерности пространственно-временной изменчивости подземного стока и особенностей чередований маловодных и многоводных серий в поверхностном и подземном стоке, а также особенностей анализа таких закономерностей создают определенную генетическую методологическую основу для обоснования рациональных форм учета этих закономерностей при планировании наиболее эффективных систем совместного использования поверхностных и подземных вод и управления ими.

---

## *Глава 3*

# **МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОГО ПРОГНОЗНОГО ВНУТРИГОДОВОГО И МНОГОЛЕТНЕГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Моделирование вероятной изменчивости гидродинамического режима подземных вод представляет самостоятельную гидрогеологическую проблему, так как может использоваться не только для вышеизложенного анализа закономерностей чередований многоводных и маловодных периодов, но и иметь более широкое практическое приложение, как в вопросах связанных с рассматриваемой проблемой, так и выходящих за ее пределы. В том числе смоделированные ряды возможных в будущем колебаний уровней и расходов подземных вод могут использоваться при различных типах строительства в целях определения продолжительности и интенсивности подтопленного состояния сооружений, лесных угодий и сельскохозяйственных земель, обоснования оптимальных глубин заложения фундаментов и необходимость их противофильтрационной защиты (гидроизоляции), планирования дренажных сооружений, учитываться в моделях расчетов естественных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод при планировании рациональных отъемов стока и режимов использования подземных вод и др.

Преимущества прогнозного (модельного) ряда характеристик гидродинамического режима подземных вод (т.е. их уровней или расходов) по сравнению с фактическим наблюдаемым рядом, как уже указывалось выше, заключается в возможностях получения для анализа достаточно продолжительных гидрогеологических рядов, позволяющих дать более достоверные диапазонные оценки возможной изменчивости этих харак-

теристик во времени, в том числе могут быть обосновано появление значений редкой повторяемости, не зафиксированных фактическими наблюдениями, получать прогнозные непрерывные ряды внутригодового и многолетнего режима подземных вод любой заданной длины, а также заданной вероятности среднего значения, необходимой для решения той или иной задачи и создания требуемой гарантированности обеспеченности водопотребления или восполнения сработанных запасов подземных вод.

Сколько-нибудь достоверных детерминированных долгосрочных прогнозов естественного режима подземных вод на сегодня не существует. Это определено прежде всего недостаточностью соответствующего прогресса в гидрометеорологической науке и в итоге отсутствием методов долгосрочных прогнозов атмосферных осадков, испарения, температур воздуха и речного стока, определяющих в наибольшей мере поведение подземных вод и являющихся основными предикторами в прогнозах их режима.

Сложность прогнозов или моделирование возможных в будущем колебаний уровней и расходов подземных вод определяется значительной долей случайных процессов или случайным сочетанием различных режимообразующих факторов, управляющих режимом. К таковым относится случайность времени и количества выпадающих атмосферных осадков, переменность во времени их долей, расходуемых на испарение, поверхностный сток и инфильтрацию, расходование и накопление влаги в зоне аэрации, переменность во времени разгрузки подземных вод в реки, определяемой изменяющимися во времени глубинами залегания или мощностями грунтовых вод, переменность положения базиса дренирования, незакономерной периодичностью промерзания зоны аэрации, препятствующей инфильтрации и т.д. Предсказать все эти процессы практически невозможно.

Одновременно с этими случайными процессами значительную роль в формировании внутригодового режима подземных вод играют детерминированные процессы, проявляющиеся в периоды практического отсутствия питания подземных вод, когда поведение уровней и расходов подземных вод определяется независимым стоком или естественной разгрузкой накопленных за периоды сезонного восполнения запасов подземных вод.

Этапы независимого не осложненного питанием стока подземных вод наблюдаются наиболее четко в зимнее время, когда зона аэрации проморожена и атмосферные осадки накапливаются на поверхности земли в виде снежного покрова, а также нередко и в летнее время, когда атмо-

сферные осадки практически не участвуют в питании подземных вод и в большей своей части расходуются на склоновый сток и испарение с поверхности земли и из зоны аэрации.

Значительная роль случайных процессов в формировании стока предопределила невозможность составления долгосрочных детерминированных гидродинамических прогнозов как среднегодовых значений, так и тем более внутригодовой изменчивости режима подземных вод и подземного стока с заблаговременностью свыше одного года. В тех же случаях, когда такой прогноз требовался, он осуществлялся, главным образом, на основе статистического (вероятностного) анализа рядов фактических наблюдений. При этом прогноз вероятных многолетних изменений среднегодовых или меженных годовых значений подземного стока осуществлялся методом статистических испытаний – Монте-Карло. Прогнозы же вероятных внутригодовых изменений уровней или расходов подземных вод выдавались в виде гипотетического графика режима подземных вод для года заданной обеспеченности в зависимости от степени его водности. Для этого использовались обычно два варианта:

1) Из эмпирического ряда многолетних наблюдений выбирался год заданной обеспеченности (50, 90, 95% и др.) по среднегодовым значениям уровней или расходов подземных вод и для этого года брались его конкретные внутригодовые изменения уровней или расходов подземных вод чаще всего среднемесячные фактические данные. Этот способ широко используется в гидрологии и известен как «метод фрагментов» [58].

2) Из эмпирического ряда наблюдений выбирались значения уровней или расходов подземных вод заданной обеспеченности, рассчитанной по каждому месяцу в отдельности, также чаще всего по среднемесячным данным [28].

В первом случае далеко не всегда, к примеру, маловодный год, выбранный по среднегодовым значениям, оказывался также маловодным и по меженным значениям, что не давало права использовать такой подход для прогнозных расчетов внутригодового режима стока, с необходимой надежностью. Во втором случае конструировались минимальные из минимальных и максимальные из максимальных варианты внутригодового режима подземных вод, что реально в природе не встречалось и возможно появится лишь теоретически. Такой подход в итоге занижает значения внутригодовых уровней и расходов подземных вод для маловодных лет и завышает их для многоводных лет, хотя и создает определенный инженерный запас в проектных расчетах, когда это требуется.

Однако и тот и другой путь пригодны лишь для оценки вероятного внутригодового режима подземных вод для отдельно взятого года –

заданной обеспеченности и не могут быть использованы для моделирования прогнозного многолетнего, непрерывного ряда, т.к. не обеспечивают плавной стыковки годовых графиков прогнозных многолетних рядов, отражающих последовательности лет различной обеспеченности, формирующихся случайно.

Моделирование такого ряда возможно на основе лишь динамико-стохастической модели формирования гидродинамического режима подземных вод, предусматривающей возможность одновременного комбинированного использования для прогнозов режима как вероятностных, так и детерминированных методов прогноза колебаний уровней и расходов подземных вод.

Концептуальный подход такого прогноза рассматривался нами ранее [32]. Заключается он в последовательном конструировании фрагментов внутригодовых гидрогеологических рядов, состоящих из спрогнозированных методом Монте-Карло случайных величин амплитуд весеннего и осеннего подъема уровней (расходов) подземных вод с последующим гидродинамическим расчетом по уравнению Майе-Буссинеску независимого их спада от прогнозных случайных максимумов до начала очередного периода питания подземных вод. Особенности методики такого прогноза лучше всего продемонстрировать на конкретном примере.

В основу прогнозной модели закладывается типовой график режима подземных вод с определением характерных абсолютных и временных положений экстремальных уровней или расходов подземных вод и диапазонов их возможных изменений в многолетнем разрезе. Для территории России можно выделить три типа таких графиков (рис.3.1). Для большей части страны с типичным зимним промерзанием зоны аэрации основное питание подземных вод осуществляется весной, а также при небольших глубинах залегания грунтовых вод осенью. Поэтому здесь можно наблюдать либо один ежегодный весенний максимум, либо два максимума – весенний и осенний (см. рис.3.1а, б). Соответственно на графиках внутригодового режима выделяются либо только предвесенний минимум и весенний максимум, либо дополнительно летний минимум и осенний максимум. Возможна также комбинация этих двух типов режима, когда весенний максимум проявляется не ежегодно, а лишь в отдельные годы с повышенным количеством осенних атмосферных осадков.

В западных и южных районах страны со спорадическим промерзанием зоны аэрации может быть встречен третий тип гидродинамического режима грунтовых вод с осенне-зимним подъемом, весенним максимальным уровнем и летним минимумом (см. рис.3.1в).

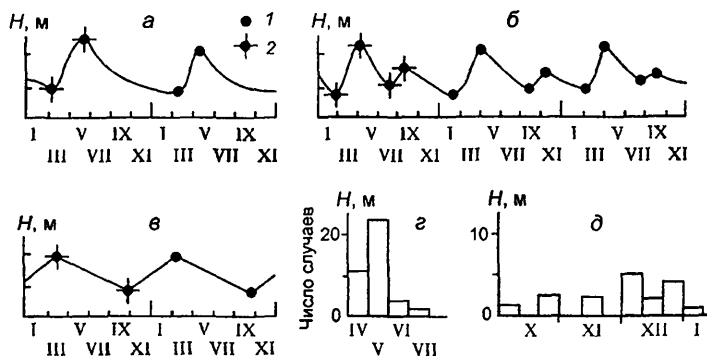


Рис. 3.1. Характерные изменения внутригодового режима уровней грунтовых вод с преимущественно весенним (а), весенне-осенним (б) и зимне-весенним (в) питанием грунтовых вод, а также гистограммы времени наступления весенних (г) и осенних (д) максимумов в Подмосковье

1 – среднемноголетнее положение экстремумов; 2 – диапазоны изменений положений экстремумов за период многолетних наблюдений

Вероятный размах многолетней изменчивости экстремальных положений уровней (расходов) подземных вод обозначается на графиках в виде интервалов наблюдавшихся отметок или глубин залегания уровней, а также, одновременно, диапазонов времени их наступления. Статистический анализ или построение гистограмм положений этих точек позволяет выбрать их среднемноголетнее значение как по времени, так и по абсолютной величине. Апробация методологии моделирования прогнозного ряда была осуществлена для двух скважин Подмосковья (п. Щемилово), с характерными графиками режима уровней грунтовых вод, соответствующими первому и второму типам (см. рис.3.1а, б). Продолжительность наблюдений составила здесь 42 года.

Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о независимости весенних и осенних значений амплитуд и практическое отсутствие их внутрирядной связанности за многолетие. Оба ряда показали визуально прослеживаемую, но статистически незначимую (с коэффициентом корреляции всего 0,17) тенденцию к подъему уровней грунтовых вод. Незначительный к тому же градиент положительного тренда (0,006 м/год или 6 мм/год) позволяют пренебречь этим процессом и не учитывать его в прогнозных оценках, т.е. рассматривать данные ряды случайными и стационарными.



Прогноз многолетнего ряда весенних амплитуд осуществлен методом Монте-Карло по специальной программе, учитывающей, помимо статистических параметров ряда характер закона распределения и степень взаимосвязанности ряда [27].

Прогноз осенних амплитуд осуществлен тем же методом, но графически в силу того, что осенние амплитуды в значительном количестве лет отсутствовали, т.е. в хронологическом ряду их значений оказалось много нулей, было трудно аппроксимировать их распределение каким-либо из существующих вероятностных законов (рис. 3.2).

Принимая во внимание целенаправленность данного прогноза на оптимизацию работы водозаборных сооружений, прогнозный расчет осуществляется на 25 годовых циклов, что соответствует амортизационному сроку работы водозаборов. На такой же срок обычно осуществляются и оценки эксплуатационных запасов подземных вод на разведываемых участках под водозаборы.

Как уже отмечалось выше, прогнозные выборочные ряды, полученные методом статистических испытаний, каждый в отдельности не являются репрезентативным и в каждом из таких коротких рядов может быть встречено различное количество и сочетание маловодных и многовод-

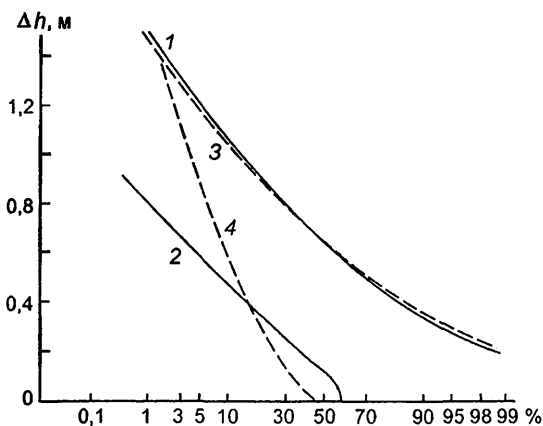


Рис. 3.2. Графики обеспеченности фактических весенних (1) и осенних (2) амплитуд колебаний уровней грунтовых вод, а также обеспеченности прогнозных значений 25-летних рядов весенних (3) и осенних (4) колебаний уровней грунтовых вод по скв. 30

ных серий, что в определенной мере делает неоднозначным прогноз по любому из принятых отрезку генеральной совокупности. Анализ таких 25-летних отрезков из прогнозного 1000-летнего ряда показал, что наилучший с позиций водообеспечения ряд является такой, в котором встречается наибольшее количество маловодных серий или 1–2 маловодные серии значительной продолжительности. Это находит отражение в среднемноголетнем (из 25 лет) значении выборочного прогнозного ряда. Следует еще раз отметить, что анализ значительного (свыше 200) количества фактических наиболее продолжительных (свыше 40 лет) рядов подземного стока по бывшей территории СССР показал, что при водоотборе, соответствующем среднемноголетнему стоку 95 и даже 90% обеспеченности, маловодные серии продолжительностью свыше одного года как правило не встречаются [26, 27].

Все это позволяет выбрать в качестве наиболее гарантированных прогнозные ряды с среднемноголетними значениями весенних (и там, где это требуется) осенних амплитуд 95% обеспеченности. Решая подобную задачу для каких-либо других целей, например, для оценки степени и продолжительности подтопленности городских территорий, в качестве прогнозного ряда можно использовать выборочные ряды намного большей продолжительности с обеспеченностью среднемноголетнего их значения, соответствующей 50 или даже 5% обеспеченности среднемноголетнего их значения.

Прогноз независимого летнего и зимнего спада уровней грунтовых вод осуществлялся по уравнению:

$$H_t = H_{0t} \cdot e^{-\alpha}, \quad (3.1)$$

где  $H_t$  – прогнозные значения уровней, рассчитываемые в пределах всего периода их спада с интервалами времени  $t$  равными 10–30 суток;  $H_{0t}$  – прогнозное значение весеннего или осеннего максимума для каждого из 25 годовых циклов.

В качестве начальных ( $H_0$ ) уровней, от которых начинается их снижение, использовались прогнозные значения амплитуд весенних или осенних максимумов.  $\alpha$  – коэффициент истощения, определяемый из соотношения

$$\alpha = \frac{\ln H_0 - \ln H_t}{\Delta t_i}. \quad (3.2)$$

Коэффициент истощения рассчитывался для периодов летне-зимнего спада для скв. 21, где осенние максимумы практически отсутствуют, и

отдельно для периодов летнего и зимнего спада для скв. 30, там, где отмечаются и тот и другой максимумы.

Расчеты  $\alpha$  производились по фактическим рядам наблюдений по каждому году в отдельности, за исключением некоторых лет, где независимость спада уровней была существенно нарушена растянувшимся во времени процессом питания грунтовых вод.

Учитывая то, что величина коэффициента истощения зависит от величины дренируемой мощности потока грунтовых вод, были построены графики зависимости  $\alpha = F(\Delta h)$ , с которых затем снимались значения  $\alpha$  для соответствующих прогнозных весенних и осенних величин  $\Delta h$  (рис.3.3). Смоделированные ряды амплитуд показали возможное увеличение их размаха по сравнению с наблюдавшимися, что потребовало для целей прогноза экстраполяции графиков зависимости коэффициентов истощения от амплитуд колебаний уровней.

Конструирование прогнозного ряда может начинаться от любого последнего наблюдавшегося экстремального положения уровней грунтовых вод (предвесеннего минимума, весеннего максимума, летнего минимума или осеннего максимума). В том случае, если последним наблюдался, например, предвесенний минимум, к нему пристраивается первое из прогнозного ряда значение весеннего подъема уровней грунтовых вод. От полученного таким путем первого максимума рассчитывается спад уровней по уравнению (3.1), сняв предварительно с графика (см. рис.3.3а) значение  $\alpha$ , соответствующее прогнозной величине  $\Delta h_{\text{в}}$ . При отсутствии

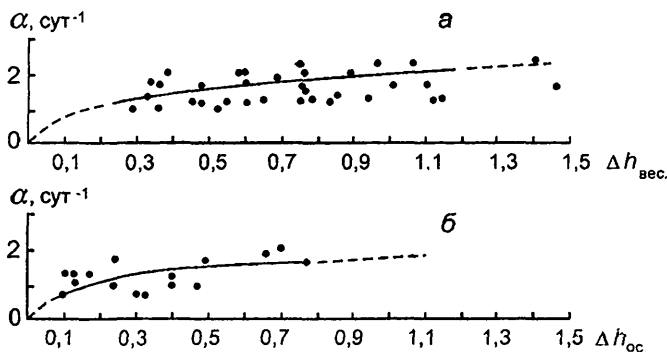


Рис. 3.3. Зависимость коэффициентов истощения летнего (а) и зимнего (б) спада уровней грунтовых вод (скв. 30) от амплитуд их весеннего и осеннего подъема

осеннего максимума спад уровней рассчитывается до периода среднестатистического начала весенних подъемов уровней грунтовых вод. К полученной таким образом отметке первого прогнозного предвесеннего минимума пристраивается второе в прогножном ряду значение амплитуды весеннего подъема уровней  $\Delta h_{\text{в}}$ , приуроченное к среднестатистическому положению времени наступления этого максимума.

При наличии осенних максимумов летний спад уровней рассчитывается до начала осенних подъемов уровней. В среднестатистическое время наступления осеннего максимума пристраивается первое прогнозное значение осеннего максимума и от него рассчитывается спад уровней до момента наступления предвесеннего минимума. Значение  $\alpha$  в этом случае снимается с графика (см. рис.3.3б). В случае, если в прогножном ряду осенних амплитуд ее величина равна нулю, летний спад уровней рассчитывается как и в предыдущем примере до следующего предвесеннего минимума, т.е. прогноз позволяет моделировать случайность появления и отсутствия осенних максимумов. Аналогичный прогнозный расчет может осуществляться для дебитов источников и подземного стока в реки (при отсутствии его берегового регулирования), а также для третьего типа режима уровней грунтовых вод (см. рис.3.1в).

На рисунке 3.4 приведен фрагмент полученного прогнозного ряда возможных внутригодовых изменений уровней грунтовых вод для наиболее маловодного периода, а на рисунке 3.5 – весь прогнозный ряд, построенный по среднегодовым значениям. Здесь необходимо подчеркнуть, что полученный прогнозный ряд является не хронологическим, а вероятностным. Выбор для выполненных прогнозов значений амплитуд 95% уровня значимости подтвердил возможность получения наиболее «жестких ситуаций» с маловодными сериями в выборочном ряду. Как видно из рисунка 3.5, в прогножном ряду среднемесячных значений уровней



Рис. 3.4. Фрагмент прогнозного ряда внутригодового режима уровня грунтовых вод (скв. 30)

Штриховая линия – среднее многолетнее значение УГВ 95% обеспеченности

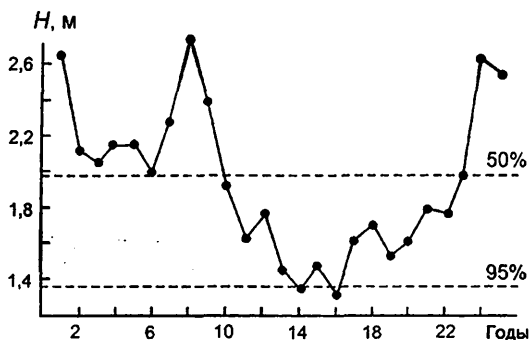


Рис. 3.5. Прогнозный ряд среднегодовых значений уровней грунтовых вод  
Штриховые линии – значения УГВ 95% и 50% обеспеченности

отмечен 12-летний маловодный цикл. Однако относительно среднемноголетних уровней 95% обеспеченности более продолжительных чем однолетние маловодные серии не встречено, что создает предпосылки для предпочтительности или по меньшей мере возможности ежегодного регулирования водных ресурсов. В 25-летнем прогножном ряду среднемесячных значений оказалось 9 маловодных периодов с уровнями ниже 95% обеспеченности. Продолжительность этих периодов изменялась от 2 до 7 месяцев, в среднем – 3,4 месяца, шесть из них встречены подряд, т.е. могут встретиться ежегодно. Это обязывает оценивать гарантированность ежегодного восполнения срабатываемых запасов подземных вод при обосновании надежности функционирования систем совместного использования поверхностных и подземных вод. С аналогичной периодичностью следует ожидать маловодные серии и в расходах подземных вод и формирующихся при этом дефицитах в воде, что также поддается количественным оценкам при подобных прогнозах.

Тот факт, что в прогножном ряду, составленном из среднемесячных значений уровней, встречено 9 маловодных периодов, а в ряду из прогнозных среднегодовых значений получилось лишь два маловодных периода, обязывает осуществлять моделирование прогнозных рядов, состоящих как минимум из среднемесячных значений, т.е. с учетом внутригодового распределения стока. Это позволит более объективно охарактеризовать продолжительности вероятных маловодных серий и оценить глубину дефицитов внутри них.

Спрогнозировать время наступления экстремальных положений уровней подземных вод на сегодня невозможно особенно на ряд лет вперед. Поэтому учесть его влияние на величину прогнозных минимумов можно лишь в диапазонных оценках. Так, например, расчетное значение предвесеннего минимума при смещении начала спада уровней от предыдущего максимального уровня на +17 суток по сравнению со среднегодовым временем наступления максимумов изменяется на 2–13 см или на 1–17% в среднем на 4% от среднегодовой амплитуды колебаний уровней. Поэтому в зависимости от назначения прогнозов такой ошибкой в уровнях или расходах подземных вод можно либо пренебречь, либо указывать возможный диапазон ошибок вероятных прогнозных расчетов.

Более существенным может оказаться влияние времени наступления экстремальных уровней на продолжительность маловодных периодов внутри года. В этом случае сдвиг времени наступления максимума на 17 суток может увеличить среднюю продолжительность маловодных серий до 15%, что может сказаться на возможных объемах форсированной сработки запасов подземных вод при погашении за их счет дефицитов в поверхностном стоке. Таким образом, в каждом конкретном случае для подобных расчетов следует учитывать возможный диапазон изменений продолжительности маловодных серий.

Сопоставление основных статистических параметров фактического и прогнозного рядов среднегодовых значений уровней грунтовых вод показало удовлетворительную их сходимость (табл.3.1).

Как видно из рисунка 3.4, прогнозный ряд вполне может быть использован и для установления закономерностей появления числа маловодных периодов в зависимости от принятой расчетной обеспеченности стока и для определения возможных дефицитов питания (стока) в них.

И в том, и в другом ряду отмечена тенденция к значительной по продолжительности (до 12–14 лет) группировке маловодных серий относи-

Таблица 3.1

Сопоставление параметров фактического и прогнозного рядов

| Параметры | Фактический ряд | Прогнозный ряд | Процент отклонения |
|-----------|-----------------|----------------|--------------------|
| $\bar{H}$ | 2,0             | 1,95           | 2,5                |
| $\sigma$  | 0,367           | 0,42           | 12,0               |
| $C_v$     | 0,183           | 0,21           | 13,0               |
| $C_v/C_v$ | 2,1             | 1,78           | 15,0               |
| $R\sigma$ | 0,65            | 0,69           | 6,0                |

тельно уровней 50% обеспеченности. Все это показывает, что прогнозный ряд достаточно неплохо отражает реальные условия, что позволяет рассматривать данный путь моделирования рядов вполне приемлемым.

Принимая во внимание то, что полученный подобным способом ряд многолетних последовательностей возможных изменений уровней или расходов подземных вод являются индивидуальным для каждого данного пункта наблюдений, экстраполяция данных такого прогноза с точки на площадь может осуществляться на основе известных различных экстраполяционных подходов – районирования территорий по условиям формирования режима подземных вод, по критериям аналогичности гидрогеологических условий и др. [28].

Как видно из рисунков 3.4 и 3.5, рассматриваемый динамико-стохастический прием моделирования внутригодового и одновременно многолетнего режима подземных вод позволяет: 1) получать непрерывный многолетний ряд вероятных случайных колебаний уровней или расходов подземных вод заданной продолжительности и гарантированности; 2) получать представления о характере многолетней изменчивости гидродинамического режима, вероятных чередованиях и продолжительностях серий маловодных и многоводных периодов при различных заданных среднемноголетних расходах стока; 3) оценивать глубину дефицитов в маловодные периоды как во внутригодовом разрезе, так и за многолетие в пределах любого расчетного промежутка времени любой заданной обеспеченности среднегодового стока или равного ему водоотбора (см. рис.3.4 и 3.5); 4) осуществлять необходимые вариантные или диапазонные прогнозные оценки, задаваясь значениями среднемноголетних значений уровней и расходов подземных вод различной обеспеченности, диапазонными значениями времени начала весенних паводков, т.е. моделировать различные «жесткие» или среднемноголетние ситуации с чередованием маловодных серий и возможных в них дефицитах; 5) верифицировать получаемые прогнозные ряды по их статистическим параметрам, внутрирядной связанности, спектральной структуре и законам распределения в сопоставлении с фактически наблюдавшимися рядами.

Рассматриваемый способ прогноза достаточно прост, физически обоснован и может быть реализован даже вручную. Однако конструирование такого последовательного наращивания фрагментов многолетнего ряда может быть и автоматизировано с использованием персональных компьютеров.

В заключение следует еще раз отметить преимущества модельного ряда перед фактически наблюдавшимся, даже достаточно продолжительным рядом. Использование реальных рядов наблюдений для прогнозных

вероятных оценок неизбежно ставило вопрос о том, какой длины ряд способен достаточно адекватно отразить возможную многолетнюю изменчивость режима подземных вод. Формальные оптимизационные процедуры показывают, что для оценок значений основных статистических параметров режима подземных вод (за исключением коэффициента асимметрии) достаточно иметь уже 15-летний ряд наблюдений. Однако вполне очевидно, что такой ряд не в состоянии отразить влияние на эти параметры существующих природных тенденций к длиннопериодной цикличности (19-, 22-, 33-летней, не говоря уже о вековой). Поэтому модельные ряды, хотя они и основаны на параметрах реального короткого ряда, при конструировании очень длинных временных последовательностей (1000 лет и более) позволяют выбрать из генеральной совокупности ряды для любой заданной обеспеченности их среднемноголетнего значения в выборке. В результате такой подход позволяет выбрать ряды как для оценок наиболее вероятных средних, так и любых заданных «жестких» ситуаций.

В итоге по таким выборочным рядам можно создать требуемый «запас прочности» прогнозных расчетов. К сожалению, приходится констатировать, что аналогичных методов прогноза внутригодового стока поверхностных вод пока не существует. Это связано с существенно более динамичной и незакономерной изменчивостью его режима и, прежде всего, с тем, что помимо относительно закономерных весенних и осенних паводков речной сток часто осложнен многочисленными совершенно незакономерными дождевыми паводками, нарушающими процесс независимого спада расходов рек. В этой связи методология таких прогнозов или конструирования рядов поверхностного стока требует еще дополнительной разработки.



---

---

*Глава 4*

**МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА  
ОПТИМАЛЬНОГО ВОДООТБОРА  
ПОДЗЕМНЫХ ВОД  
С УЧЕТОМ ГАРАНТИРОВАННОСТИ  
ВОСПОЛНЕНИЯ СРАБАТЫВАЕМЫХ  
ЗАПАСОВ И ДОПУСТИМЫХ УЩЕРБОВ  
ПОВЕРХНОСТНОМУ СТОКУ**

Как уже указывалось выше, одной из основных гидрогеологических проблем, обеспечивающих эффективность функционирования систем совместного использования поверхностных и подземных вод, является оптимизация водоотбора подземных вод. При этом оптимальным может считаться максимально возможный водоотбор, при котором ущерб стоку в маловодный период не превысит допустимого и когда форсированно сработанные запасы подземных вод смогут восполниться естественным путем до очередного маловодного периода, т.е. до очередного цикла водоотбора. Методология размещения водозаборов и оценок запасов подземных вод основных водоносных горизонтов достаточно полно изложена в многочисленных работах [3–6, 11, 44 и др.]. Специфика таких оценок в системах комбинированного использования поверхностных и подземных вод заключается лишь в сокращении водоотбора в маловодные периоды в целях сохранения экологически необходимого меженного стока в реке. Поэтому все эти вопросы прежде всего относятся к компенсационным водозаборам.

Вполне очевидно, что чем больше и продолжительней будет водоотбор подземных вод таким водозабором, тем больше будет ущерб речному стоку и тем большее времени потребуется для восполнения срабаты-

ваемых запасов подземных вод естественным путем. Поэтому процедура оптимизации функционирования компенсационных водозаборов должна базироваться прежде всего на переборе вариантов взаимосвязей именно этих компонентов водного баланса. Кроме того в процессе указанной оптимизации должны приниматься во внимание допустимость экологических последствий и экономическая целесообразность рассматриваемого комбинированного использования поверхностных и подземных вод, что также будет рассмотрено дополнительно в главе 5.

Методология выбора оптимального водоотбора в значительной мере зависит от гидрогеологических условий района проектируемых систем комбинированного использования поверхностных и подземных вод и, прежде всего, от условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Так, по особенностям методических подходов к решению данной задачи, можно выделить три основных типа гидрогеологических условий и соответствующих им расчетных схем:

1. Безнапорный водоносный горизонт, гидравлически взаимосвязанный с поверхностным стоком.

2. Напорный водоносный горизонт с опосредованной взаимосвязью с поверхностными водами в виде перетекания через вышележащий безнапорный горизонт и

3. Напорный водоносный горизонт, практически не взаимосвязанный с поверхностным стоком.

Как будет показано ниже, возможной и даже одной из наиболее перспективной является комбинация этих схем, например, первой и третьей или особенно второй и третьей.

Расчеты по этим схемам могут осуществляться как по аналитическим зависимостям, так и при помощи моделирования, а также как для обобщенных схем водозаборных сооружений, так и для конкретных схем размещения эксплуатационных скважин в пределах водозаборов, что зависит в основном от степени изученности (разведанности) участка проектируемого водозабора. Для рассмотрения принципиальных подходов решения данных задач воспользуемся более наглядными аналитическими зависимостями для обобщенных схем водозаборов.

Следует отметить, что в процедуре оптимизации водоотбора подземных вод может быть задействовано управление водохозяйственными системами, способными существенно повысить эффективность использования водных ресурсов водосбора в целом. В частности за счет регулирования стока в районах водохранилищ питьевого назначения можно значительно сократить как продолжительности маловодных периодов, так и объемы дефицитов в них, что позволит пропорционально повы-

сать отдачу водоносных горизонтов при форсированной эксплуатации подземных вод. В этой связи целесообразно рассмотреть для конкретных типовых условий особенности методологии выбора оптимального водотобора подземных вод применительно к естественным условиям формирования стока, как в бассейнах с незарегулированным речным стоком, так и в речных бассейнах с зарегулированным стоком.

#### **4.1. Безнапорный водоносный горизонт, гидравлически взаимосвязанный с незарегулированным поверхностным стоком**

Данная расчетная схема характерна для водозаборов, закладываемых в долинах рек, а также вблизи проточных озер. Основным эксплуатируемым водоносным горизонтом обычно служит аллювиальный, а также взаимосвязанные с ним другие водоносные горизонты (флювиогляциальные, водно-ледниковые и др., а также грунтовые воды в коренных отложениях, как подстилающие аллювий, так и слагающие прилегающие склоны долин и междуречные пространства).

Наиболее часто используемая для определения производительности водозаборов расчетная схема принимается в таких случаях в виде полужограниченного безнапорного или с местным напором пласта с контуром постоянного напора на границе (урезе реки). Водозаборные сооружения в таких условиях проектируются обычно в виде линейного ряда эксплуатационных скважин, расположенных вдоль реки.

Расчет производительности таких водозаборов для обобщенной схемы (с одинаковым расстоянием скважин от реки и между собой) чаще всего производится по уравнению Маскета-Лейбензона:

$$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot (2H - S) \cdot S}{\ln \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot r_0} + \frac{2 \cdot \pi (L + \Delta L)}{\lambda}} \quad (4.1)$$

или для напорных условий:

$$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot m \cdot S}{\ln \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot r_0} + \frac{2 \cdot \pi (L + \Delta L)}{\lambda}}, \quad (4.2)$$

где  $H$  – мощность водоносного горизонта, м;  $S$  – допустимое понижение ( $H-S=l$ , где  $l$  – длина фильтра, обеспечивающего расход  $Q$ ), м;  $Q$  – производительность одиночной эксплуатационной скважины (или куста, состоящего из 2–3 скважин на одной площадке), м<sup>3</sup>/сут;  $k$  – коэффициент фильтрации, м/сут;  $\lambda$  – расстояние между скважинами (или кустами скважин) в ряду водозабора, м;  $L$  – расстояние водозаборного ряда от реки, м;  $r_o$  – радиус эксплуатационной скважины, м;  $\Delta L$  – гидравлическое сопротивление ложа реки, м, определяемое из соотношения<sup>1</sup>:

$$\Delta L = \sqrt{\frac{k \cdot m \cdot m_0}{k_0}} \cdot \operatorname{cth} \left( \frac{2b}{\sqrt{\frac{k \cdot m \cdot m_0}{k_0}}} \right), \quad (4.3)$$

где  $k$  и  $m$  – коэффициент фильтрации и мощность нижнего хорошо проницаемого слоя под рекой;  $k_o$  и  $m_o$  – тоже, верхнего слабопроницаемого слоя, кольматирующего русло;  $b$  – ширина реки, м.

Суммарная производительность водозабора определяется по формуле  $Q_{\text{сум.}} = Q \cdot n$ , где  $n$  – число эксплуатационных скважин (кустов) в водозаборном ряду.

Следует отметить, что в зависимости от характера граничных условий и схемы размещения водозабора для расчетов производительности водозаборов могут использоваться и многие другие существующие расчетные зависимости [3, 4, 6]. В данном случае для рассмотрения методологии оптимизации водоотбора нами использована данная наиболее популярная и наглядная схема. Однако принципиальное решение задачи в других схемах будет аналогичным как и при принятой схеме.

Стабилизация уровней подземных вод в эксплуатационных скважинах водозаборов инфильтрационного типа наступает довольно быстро (от нескольких часов до нескольких дней, реже нескольких недель), что позволяет считать производительность водозаборов по зависимостям для условий стационарного режима фильтрации.

Как видно из уравнений 4.1 и 4.2, производительность водозабора при относительно однородном гидрогеологическом строении участка водозабора зависит в основном от расстояний эксплуатационных сква-

<sup>1</sup> Для расчета величины  $\Delta L$  существуют и другие графические и расчетные способы как для условий стационарного, так и неустановившегося режима фильтрации [5, 6, 28, 73].

жин до реки и между собой. Поэтому первым шагом оптимизации должно быть изучение закономерности изменчивости производительности водозабора от этих расстояний.

Рассмотреть методологию обоснования выбора оптимального водозабора лучше всего на конкретном примере. В этой связи приведем пример оценки зависимости производительности водозабора от расстояний между эксплуатационными скважинами и от реки (табл.4.1). Данные расчеты, а также все последующие оптимизационные оценки осуществлены для принятых хотя и гипотетических, но достаточно характерных гидрогеологических параметров водно-ледниковых и аллювиальных отложений средней полосы России ( $k = 10$  м/сут;  $H = 15$  м;  $r_0 = 0,1$  м,  $S = 10$  м):

Расчет зависимости производительности одиночной скважины от расстояния между скважинами показывает, что разнос скважин в линейном водозаборе в данных гидрогеологических условиях не целесообразен более чем на 300 м, максимум на 500 м. Увеличение производительности водозабора при увеличении расстояний между скважинами становится незначительным, что хорошо видно на графике на рисунке 4.1а. Это оп-

Таблица 4.1

Зависимость производительности скважин от расстояний между ними и рекой

| Расстояние<br>между<br>скважинами<br>( $\lambda$ ),<br>м | Производительность скважины, м <sup>3</sup> /сут<br>при расстояниях до реки в м ( $L + \Delta L$ ) |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                          | 150                                                                                                | 200   | 300   | 400   | 500   | 700   | 1000  |
| 100                                                      | 433,8                                                                                              | 356,4 | 262,7 | 208,2 | 200   | 128   | 92,5  |
| 300                                                      | 675,3                                                                                              | 607,3 | 504,8 | 432,2 | 377,8 | 301,7 | 227,5 |
| 500                                                      | 734,5                                                                                              | 684,8 | 605,6 | 537,2 | 484,9 | 406,2 | 326,5 |
| 700                                                      | 752,0                                                                                              | 713,6 | 647   | 593,6 | 547   | 472,9 | 393,2 |
| 1000                                                     | 756,6                                                                                              | 727,7 | 678,9 | 636,3 | 598,1 | 535,4 | 460,4 |

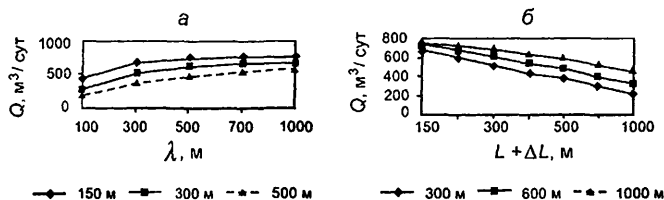


Рис. 4.1. Графики зависимости производительности скважин ( $Q$ , м<sup>3</sup>/сут)

а – от расстояний между скважинами ( $\lambda$ , м) при различной удаленности водозаборного ряда от реки; б – от удаленности водозабора от реки ( $L + \Delta L$ ) при различных расстояниях между скважинами

ределяется тем, что при расстояниях свыше 300 м каждая из эксплуатационных скважин в таких условиях работает уже практически без взаимодействия с соседними. Степень взаимовлияния эксплуатационных скважин с увеличением расстояния водозаборного ряда от реки увеличивается, что также может быть учтено при выборе оптимального размещения водозабора от реки.

Расчет зависимости производительности водозабора от его расстояния до реки, как это явствует и из уравнений (4.1) и (4.2), показывает непрерывное сокращение первой при увеличении второго, при некоторой тенденции к стабилизации, определяемой сокращением роли реки как гидравлической границы (рис.4.1б). Однако сокращение поверхностного стока при постоянной работе водозабора в любом случае произойдет, с той лишь разницей, что при наличии гидравлической связи водозабора и реки последняя не только не дополучит перехватываемый водозабором подземный сток, но и, кроме того, водозабор перехватит часть транзитного речного стока. При отсутствии роли реки как гидравлической границы (при достаточно удаленном размещении водозабора от реки и его производительности соизмеримой с разгружающимся в реку расходом подземных вод) река недополучит лишь перехватываемый подземный сток.

Как видно из выполненного расчета, возможности водно-ледникового и аллювиального водоносного горизонта для покрытия дефицита поверхностного стока невелики. Даже если создать водозабор из 30 скважин, расположенных через 300 м, в подобных условиях можно получить максимум около 20 тыс. м<sup>3</sup>/сут или около 0,2 м<sup>3</sup>/сек. При этом водозабор растянется на 9 км вдоль реки. Большую производительность водозабора можно получить соответственно при большей мощности водоносного горизонта, более высоких фильтрационных свойствах водовмещающих пород, например, в галечниках с коэффициентами фильтрации в 5–10 раз выше принятых для расчета, а также за счет искусственного подпитывания водоносного горизонта.

Следующим компонентом оптимизации водоотбора служит учет в расчетах перехвата водозабором речного стока.

Расчет ущерба поверхностному стоку во время работы водозабора инфильтрационного типа в условиях совершенной реки может быть осуществлен по Хантушу:

$$V_{\text{ущ}} = Q_{\text{сум}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{L + \Delta L}{2 \cdot \sqrt{a \cdot t}} \right), \quad (4.4)$$

где  $Q_{\text{сум}}$  – суммарный водоотбор подземных вод, м<sup>3</sup>/сут;  $t$  – время эксплуатации, сут;  $L$  – расстояние водозабора от реки, м;  $\Delta L$  – дополнительное сопротивление русловых отложений при их заиленности, м;  $a$  – коэф-

фициент урвнеспроводности пласта, м<sup>2</sup>/сут;  $a = \frac{k \cdot H}{\mu}$ ;  $k$ ,  $H$  и  $\mu$  – соответ-

ственно коэффициент фильтрации, м/сут; мощность, м; и водоотдача водовмещающих пород.

В соответствии с данным уравнением ущерб стоку зависит от размера водоотбора, его расстояния до реки и времени эксплуатации. Поэтому в целях выбора оптимального водоотбора необходимо установить зависимость этого ущерба при различных возможных вариантах водоотбора и продолжительностях дефицитного периода.

При несовершенной реке с слабопроницаемым слоем на границе раздела река–водоносный горизонт ущерб стоку может рассчитываться по уравнению Е.Л. Минкина [44]:

$$V = Q_b \cdot \left\{ \operatorname{erfc} \frac{L}{2\sqrt{at}} - 0,5 \cdot e^{-\frac{L^2}{4at}} \cdot \left[ e^{-i^2} \cdot \operatorname{erfc} z_1 + e^{-z_2^2} \cdot \operatorname{erfc} z_2 \right] \right\}, \quad (4.5)$$

$$\text{где } Z_1 = \frac{x_0}{2\sqrt{at}} + \frac{\sqrt{at}}{\sqrt{kmA_0}} \cdot \operatorname{th} \frac{b}{\sqrt{kmA_0}}, \quad Z_2 = \frac{L}{2\sqrt{at}} + \frac{\sqrt{at}}{\sqrt{kmA_0}} \cdot \operatorname{cth} \frac{b}{\sqrt{kmA_0}},$$

$A_0 = \frac{m_0}{k_0}$  – показатель сопротивления русловых отложений, м;  $k_0$  и  $m_0$  –

соответственно коэффициент фильтрации, м/сут; мощность слабопроницаемых русловых отложений, м;  $2b$  – ширина реки, м;  $a$  – коэффициент урвнеспроводности (пьеэспроводности), м<sup>2</sup>/сут.

Пример расчета ущерба поверхностному стоку приведен в таблице 4.2. применительно к возможным продолжительностям внутригодовых маловодных серий, в указанных выше гидрогеологических условиях:

Как видно из таблицы, при близком (150–300 м) заложении водозабора от реки ущерб стоку довольно быстро достигает величин, соизмеримых с водоотбором. Лишь при расстоянии свыше 700 м, водоотбор может реально покрывать возникающие в маловодные периоды дефициты поверхностного стока без одновременного существенного ущерба ему.

Допустимость ущерба речному стоку может определяться либо в соответствии с установившейся практикой ГКЗ, то есть не более 20–25% от

Таблица 4.2

Зависимость ущерба стоку от продолжительности водоотбора  
и расстояния водозабора от реки

| Расстояние<br>водозабора<br>от реки, м | Ущерб речному стоку в % от водоотбора по периодам |        |        |         |         |         |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                                        | 30 сут                                            | 60 сут | 90 сут | 120 сут | 150 сут | 180 сут |
| 150                                    | 63                                                | 72     | 78     | 80      |         |         |
| 300                                    | 32                                                | 48     | 57     | 62      |         |         |
| 500                                    | 11                                                | 24     | 34     | 40      | 45      | 49      |
| 700                                    | 2,4                                               | 10     | 18     | 24      | 29      | 34      |
| 1000                                   | 0,1                                               | 2      | 6      | 9       | 14      | 17      |

меженного 30-суточного поверхностного стока для маловодного года 95% обеспеченности, либо расчетами необходимого санитарного стока, обеспечивающего разбавление загрязнений стока до допустимых пределов, либо водохозяйственным балансом и условиями обеспечения гарантированности судоходства или рыбопроизводства в маловодные периоды. Из этих вариантов выбирается наиболее жесткий или приемлемый в данных природно-хозяйственных условиях. К этому вопросу мы еще вернемся в следующей главе.

Довольно монотонное сокращение производительности скважин и ущерба стоку с удалением водозабора от реки не позволяет однозначно обосновать оптимальное его расположение только по этим показателям в раздельности. Поэтому для нахождения оптимального расположения водозабора целесообразно устанавливать зависимость эффективной отдачи водозабора от его расстояния до реки. При этом под эффективной отдачей понимается разность суммарной производительности водозабора и ущерба речному стоку. По данным таких графиков, а также на основании сопоставления таблиц, аналогичных таблицам 4.1 и 4.2, можно, например, заключить, что при расположении водозабора в километре от реки ущерба речному стоку практически не будет даже при маловодном периоде в 90–120 суток. Размеры ущерба стоку будут при этом находиться лишь в пределах точности гидрологических измерений и его практически трудно будет зафиксировать. В этом случае водоотбор на каждую эксплуатационную скважину при расстоянии между скважинами 500 м составит, как видно из таблицы 4.1, 326,5 м<sup>3</sup>/сут, а суммарный эффективный водоотбор при 30 скважинах составит 9800 м<sup>3</sup>/сут. При уменьшении расположения водозабора от реки до 500 м производительность скважин возрастет до 484,9 м<sup>3</sup>/сут, а суммарный водоотбор до 14,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Однако ущерб стоку в зависимости от продолжительности водоотбора также возрастет и составит от 34 до 40% от суммарного отбора при про-



должительности дефицитного периода в 90–120 суток. Это по существу ликвидирует преимущество совместной эксплуатации поверхностных и подземных вод при продолжительности маловодного периода свыше трех месяцев, т.к. дополнительного прироста водоотбора по сравнению с водозабором, расположенном в 1 км, не произойдет. Так, при продолжительности работы водозабора 3 месяца эффективная его отдача (за вычетом ущерба) составит 9,6 тыс. м<sup>3</sup>/сут, а при 4-х месяцах – еще меньше, лишь 8,7 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

В итоге графики зависимости эффективной отдачи водоотбора от его расстояния до реки имеют четко выраженный экстремум, позволяющий обосновать оптимальное заложение водозабора (рис.4.2.).

Одним из важнейших звеньев в общем комплексе обоснования выбора оптимального режима комбинированного использования поверхностных и подземных вод является исследование закономерностей чередований маловодных серий в поверхностном стоке их продолжительности и глубины дефицитов стока при заданных объемах среднегодового водоотбора.

Как уже отмечалось выше, продолжительность маловодных периодов и объемы дефицитов стока в них зависят от заданной величины среднегодового стока, на которую может быть ориентирован водоотбор. Анализ зависимостей (вероятных дефицитов стока от расчетного среднегодового стока может осуществляться, как уже отмечалось выше, на основе многолетних рядов фактических наблюдений и по смоделированным рядам. Методология такого анализа также рассматривалась выше (см. гл. 2, 3) применительно и к выделению многолетних и к внутригодовым маловодным сериям. Учитывая наибольшую перспективность сезон-

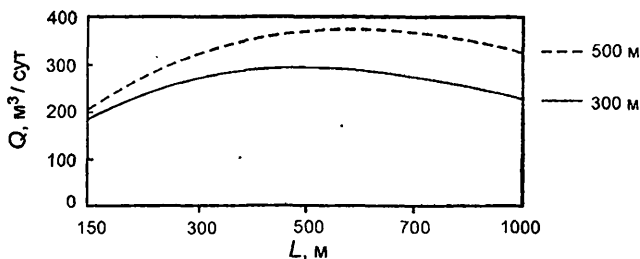


Рис. 4.2. График зависимости эффективной отдачи водозабора (разности производительности скважин и ущерба стоку) от расстояний водозаборного ряда от реки ( $L$ , м) при различных расстояниях между скважинами, равными 300 м и 500 м

ного регулирования поверхностного стока, аналогичный анализ наиболее эффективно может быть выполнен по многолетним рядам, составленным по среднемесячным значениям стока.

Принимая во внимание то, что на большей части России преобладают реки со снеговым питанием, где в период снеготаяния проходит до 50% и более годового стока, а также нередко существенными бывают и осенние паводки, можно быть уверенным, что во многих случаях покрытие маловодных сезонных зимних и летних меженных дефицитов стока в той или иной мере будет осуществляться ежегодно в последующие за ними паводковые весенние и осенние многоводные периоды, естественно при обоснованном выборе оптимальной обеспеченности среднегодового водоотбора из речного стока. Возможность полного восполнения сбратываемых в межень запасов подземных вод показывает опыт эксплуатации многочисленных инфильтрационных водозаборов, в которых в паводок часто происходит практически полное восстановление уровней грунтовых вод.

Таким образом, для определения продолжительности маловодных серий и дефицитов в них необходимо построение многолетних графиков по среднемесячным значениям речного стока и их разбиение горизонтальными линиями, соответствующими среднегодовым значениям речного стока, позволяющим увеличивать проектный водоотбор из поверхностных или взаимосвязанных с ними подземных вод при сохранении требуемого экологического стока.

Возникающие при этом дефицитные меженные периоды, когда расход реки не обеспечивает заданного среднегодового водоотбора (при условии сохранения экологического стока) предполагается покрывать периодической форсированной эксплуатацией подземных вод. Пример анализа таких графиков осуществлен для двух рек Подмосковья с малыми площадями водосборов и небольшими расходами поверхностного стока, для долины р. Лама (пост Егорье) и долины р. Москвы в ее верховье (пост Барсуки). Комбинированное использование поверхностных и подземных вод наиболее важно именно в такого типа малых водосборах с ограниченными водными ресурсами. Фрагмент такого графика для наиболее маловодных лет по р. Лама приведен на рисунке 4.3, а пример анализа таких графиков приведены в таблице 4.3.

Как видно из таблицы 4.3, минимальный среднемесячный сток в год 95% обеспеченности в долинах рек Ламы и Москвы составляет всего, соответственно, 1 м<sup>3</sup>/сек и 0,5 м<sup>3</sup>/сек.

Максимально возможные эксплуатационные запасы подземных вод, которые могли бы быть утверждены в долинах этих рек при самостоя-

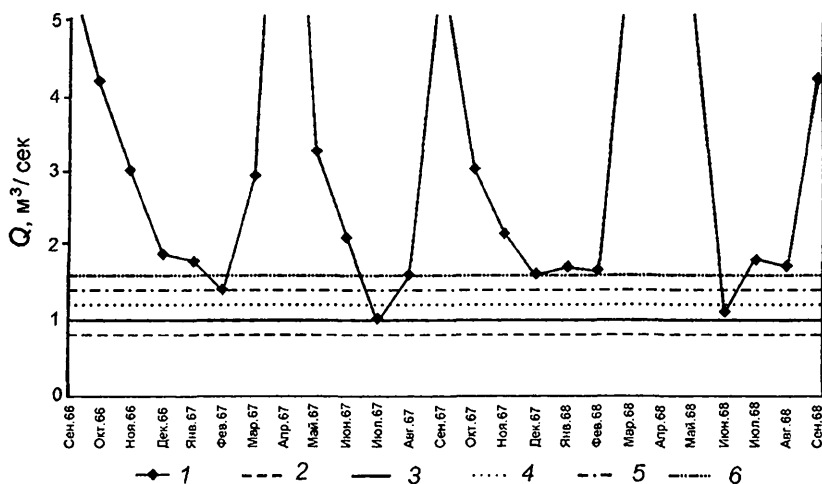


Рис. 4.3. Фрагмент гидрографа р. Лама

1 – расход реки; 2–6 – расчетные среднееголетние значения стока: 2 – 0,8, 3 – 1 (95%), 4 – 1,2, 5 – 1,4, 6 – 1,6  $\text{м}^3/\text{сек}$

тельном использовании только подземных вод, оценены в соответствии с принятой практикой в размере допустимого ущерба стоку до 20% от меженного среднееголетнего расхода рек в год 95% обеспеченности при стационарной круглогодичной работе водозабора. Кстати, при организации водоснабжения только за счет поверхностных вод подобное ограничение также существует, то есть отбор поверхностных вод не должен снизить меженный расход рек более чем на 20%. Поэтому в данном случае потенциальные эксплуатационные запасы подземных вод численно

Таблица 4.3

Исходные характеристики водных ресурсов в бассейнах рек Лама (пост Егорье) и Москва (пост Барсуки) в наиболее маловодные годы

| Водосбор рек   | Минимальный среднееголетний сток 95% обеспеченности, $\text{м}^3/\text{сек}$ | Максимальные эксплуатационные запасы подземных вод, $\text{м}^3/\text{сек}$ | Экологический сток, $\text{м}^3/\text{сек}$ | Варианты расчетного среднегодового стока, $\text{м}^3/\text{сек}$ |     |      |      |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----|------|------|
|                |                                                                              |                                                                             |                                             | 1                                                                 | 2   | 3    | 4    |
| Лама-Егорье    | 1,0                                                                          | 0,2                                                                         | 0,8                                         | 1,2                                                               | 1,4 | 1,6  | 1,8  |
| Москва-Барсуки | 0,53                                                                         | 0,13                                                                        | 0,4                                         | 0,66                                                              | 0,8 | 0,93 | 1,05 |

равны и возможному потенциальному водоотбору из поверхностных вод в маловодный период.

С учетом такого ограничения, эксплуатационные запасы подземных вод, взаимосвязанных с рекой, не превышают на этих участках рек соответственно 200 л/сек и 130 л/сек. При таком водоотборе остаточный экологический сток в реках в самый маловодный месяц года 95% обеспеченности сохранится в размере 0,80 и 0,40 м<sup>3</sup>/сек.

При ориентации водоотбора на вышеуказанные расчетные среднегодовые расходы рек, обеспечивающие увеличение производительности водозаборов в 2–4 раза (с условием обязательного сохранения экологического стока) оценены возможные продолжительности маловодных периодов и дефицитов в них для 4-х вариантов (см. табл. 4.3).

Следует еще раз подчеркнуть, что в данном случае рассматривается близкий к реальному, но все-таки относительно абстрактный пример, когда в долине существует только один водоносный горизонт, приуроченный к аллювиальным или водноледниковым отложениям, на который может быть ориентировано водоснабжение из подземных вод. При этом предполагается, что другие водоносные горизонты либо отсутствуют, либо содержат некондиционные для питьевого водоснабжения воды, либо интенсивно эксплуатируются самостоятельно и дополнительная на них нагрузка не целесообразна. Все эти факторы встречаются довольно часто, что позволяет рассматривать данный вариант использования водных ресурсов как вполне вероятный.

С увеличением расчетного стока в соответствии с принятыми вариантами наращивания водоотбора можно убедиться, что число и продолжительность маловодных серий растет. Так, в бассейне Ламы в 38-летнем ряду при среднегодовом стоке в 1,2 м<sup>3</sup>/сек может встретиться лишь 6 маловодных периодов продолжительностью в 1 месяц. При стоке

таблица 4.3 (окончание)

| Максимальная продолжительность маловодного периода (сут) в вариантах |    |     |     | Требуемая средняя производительность компенсационного водозабора в м <sup>3</sup> /сек (числитель) при продолжительности водоотбора (сут) в вариантах (знаменатель) |        |        |          |         |         |        |        |
|----------------------------------------------------------------------|----|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|----------|---------|---------|--------|--------|
| 1                                                                    | 2  | 3   | 4   | 1а                                                                                                                                                                  | 1б     | 2а     | 2б       | 3а      | 3б      | 4а     | 4б     |
| 30                                                                   | 60 | 60  | 90  | 0,2/30                                                                                                                                                              | –      | 0,4/30 | 0,3/60   | 0,6/30  | 0,45/60 | 0,6/60 | 0,4/90 |
| 30                                                                   | 90 | 120 | 150 | 0,13/30                                                                                                                                                             | 0,1/60 | 0,2/90 | 0,23/120 | 0,36/90 | 0,3/150 | –      | –      |

Таблица 4.4

**Зависимость числа и продолжительности маловодных периодов  
от величины среднегодового стока**

| Бассейн рек | Среднегодовой сток, м <sup>3</sup> /сек | Число маловодных периодов (числитель), продолжительность маловодных периодов кратных месяцу (знаменатель) |     |     |     |     |
|-------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|             |                                         |                                                                                                           |     |     |     |     |
| Лама        | 1.2                                     | 6/1                                                                                                       |     |     |     |     |
|             | 1,4                                     | 8/1                                                                                                       | 3/2 |     |     |     |
|             | 1,6                                     | 10/1                                                                                                      | 4/2 |     |     |     |
|             | 1,8                                     | 14/1                                                                                                      | 8/2 | 1/3 | 1/4 |     |
| Москва      | 0,66                                    | 4/1                                                                                                       |     |     |     |     |
|             | 0,80                                    | 7/1                                                                                                       | 1/2 | 2/3 |     |     |
|             | 0,93                                    | 13/1                                                                                                      | 6/2 | 5/3 | 1/4 |     |
|             | 1,05                                    | 16/1                                                                                                      | 7/2 | 8/3 | 4/4 | 1/5 |

в 1,4 м<sup>3</sup>/сек месячных серий становится 8, но появляются 3 двухмесячных серии и т.д. Закономерность нарастания числа и продолжительности серии с увеличением величины расчетного стока представлена в таблице 4.4.

Аналогичные зависимости могут быть установлены и расчетным путем на основе вероятностных оценок [55].

Расчеты производительности водозаборов для каждого из выбранных вариантов наращивания отбора осуществлялись для самых «жестких» условий по продолжительности маловодного периода. Однако, принимая во внимание то, что в отдельных случаях суммарный дефицит стока (объем дефицита) в менее продолжительной серии (например, трехмесячной) оказывался большим, чем в 4-месячной серии, были рассчитаны подварианты для каждой из таких серий отдельно. Для этой цели рассчитывались средние дефициты стока и соответствующие им средние производительности водозабора за маловодный период. Расчет для обоих подвариантов целесообразен для выяснения в каком из них эффективный водоотбор (отбор минус ущерб) будет выше, что далеко не всегда очевидно без конкретного расчета. В качестве наиболее «жесткого» рас-

Таблица 4.5

**Зависимость ущерба стоку от производительности водозабора  
и продолжительности маловодных периодов**

| Водосбор рек | Варианты производительности водозаборов, м <sup>3</sup> /сек / тыс. м <sup>3</sup> /сут |           |           |           | Расстояние водозаборов от реки, М | Производительность скважин, м <sup>3</sup> /сут |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|
|              | 1                                                                                       | 2         | 3         | 4         |                                   |                                                 |
| Лама         | 0,2/17,3                                                                                | 0,4/34,5  | 0,6/103,4 | 0,8/120,7 | 700                               | 550                                             |
| Москва       | 0,13/11,2                                                                               | 0,26/22,5 | 0,4/44,8  | 0,52/46,0 | 1000                              | 600                                             |

четного варианта в таких случаях принимался подвариант с наибольшим средним дефицитом стока.

Таким образом, анализ рядов фактических наблюдений за поверхностным стоком позволяет определить варианты и подварианты возможных дефицитов стока и зависимости роста последних при увеличении возможного использования водных ресурсов.

Для оценок возможного отбора подземных вод, требуемого для погашения дефицита поверхностного стока в маловодные периоды использованы приведенные выше гипотетические гидрогеологические параметры и выполненные по ним варианты расчеты производительностей водозаборов (см. табл. 4.1, 4.2).

Выбор оптимального водоотбора осуществляется последовательным подбором средней за маловодный период производительности водозабора и необходимого для этого числа эксплуатационных скважин при различных расстояниях водозабора от реки, используя таблицу 4.1, допустимых ущербов стоку не более 20% от минимального среднемесячного стока года 95% обеспеченности, с учетом таблицы 4.2. Пример таких вариантных оценок приведен в таблице 4.5. При этом при рассмотрении возможных характеристик водозаборов принимаются во внимание предварительные выводы, полученные при анализе таблиц 4.1 и 4.2 (по оптимальным расстояниям между эксплуатационными скважинами, между водозабором и рекой и зависимостям эффективной отдачи водозабора от расстояния до реки). Оценка оптимальных вариантов производительности компенсационных водозаборов произведена применительно к погашению наиболее высоких дефицитов стока.

В использованных примерах в долинах Ламы и Москвы выбрано 4 таких варианта (см. табл. 4.5). По каждому из таких вариантов непосредственно по графику или таблицам данных фактических наблюдений определяются объемы дефицитов и продолжительности дефицитных периодов. Затем рассчитывается требуемая средняя производительность компенсационного водозабора, необходимая для покрытия суммарного объема дефицита (см. табл. 4.3).

таблица 4.5 (окончание)

| Ущерб стоку<br>в % от минимального месячного стока<br>95% обеспеченности в вариантах |      |      |     |     |     |    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-----|-----|-----|----|----|
| 1а                                                                                   | 1б   | 2а   | 2б  | 3а  | 3б  | 4а | 4б |
| 0,48                                                                                 | —    | 0,96 | 3   | 1,4 | 5   | 6  | 7  |
| 0,025                                                                                | 0,38 | 2,2  | 3,9 | 4,4 | 7,9 | —  | —  |

Расчет средней производительности водозабора ведется с учетом конкретных дефицитов стока каждого из дефицитных месяцев, например для

трехмесячного маловодного периода  $\frac{Q_1 \cdot 30 + Q_2 \cdot 30 + Q_3 \cdot 30}{90} = Q_{\text{ср.}}$ , где  $Q_1$ ,

$Q_2$  и  $Q_3$  – дефициты стока в каждом из этих трех месяцев.

Определение средней производительности водозабора ( $Q_{\text{ср.}}$ ) является лишь расчетным приемом, позволяющим обобщенно получить величину допустимого понижения уровней в эксплуатационных скважинах на конец расчетного (дефицитного) периода. В реальных же условиях производительность водозабора может быть переменной, пропорциональной величинам дефицитов по месяцам.

Критериальным в выборе оптимального компенсационного водоотбора является допустимость ущерба стоку в пределах дефицитного периода. Для этого по каждому из вариантов или подвариантов рассчитывается сначала размер ущерба стоку в абсолютном его выражении, а затем в процентах от минимального среднемесячного стока 95% обеспеченности. Критерием допустимого ущерба нами выбран ущерб стоку до 5% от минимального среднемесячного стока, то есть в пределах точности гидрологических измерений. Однако при необходимости и при соответствующей аргументации этот предел может быть и изменен как в ту, так и в другую сторону.

В выбранных примерах расчеты произведены, как уже указывалось, по 4 вариантам с подвариантами, когда помимо максимальной продолжительности маловодной серии встречались и менее продолжительные. но с большим средним дефицитом.

Примеры исходных данных для расчетов таких вариантов и подвариантов даны в таблице 4.3, а расчеты ущербов стоку по ним в таблице 4.5.

Как видно из таблицы, оптимальным (максимально возможным) компенсационным водоотбором может быть принят в долине р. Ламы 0,6 м³/сек (вариант 3), а в долине р. Москвы – 0,26 м³/сек (варианты 2 или 3а), при которых ущербы стоку не превысят 5%. Подключение такого дополнительного компенсационного водозабора в маловодные периоды позволит увеличить эксплуатационные запасы подземных вод в долине р. Ламы в 4 раза, а в долине р. Москвы в 3 раза. Дальнейшее увеличение запасов, соответственно до 5 и 4 раз приведет к увеличению ущерба до 7–8%, что также не очень существенно.

Таким образом, на изученных участках долин рек Лама и Москва водозаборы с суммарной производительностью 0,8 м³/сек и 0,39 м³/сек (т.е.

минимальные эксплуатационные запасы плюс компенсационный водоотбор) могут работать постоянно круглогодично. При этом большую часть времени этот водоотбор может осуществляться, либо непосредственно из реки, либо, что более предпочтительно, из подземных вод инфильтрационным водозабором, заложенным в наиболее благоприятных гидрогеологических условиях. Лишь в отдельные маловодные периоды года при снижении расходов в реке до того момента, когда разность между расходом реки и производительностью основного водозабора будет равняться величине экологического стока, основной водозабор должен снижать свою производительность, вплоть до отключения, а одновременно должен включаться компенсационный водозабор с производительностью равной снижению производительности основного водозабора.

Так, в долине р. Лама основной водозабор может работать большую часть года с производительностью  $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$  и с максимально возможным сокращением водоотбора до  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$  в наиболее маловодные периоды. Компенсационный водозабор наоборот может включаться лишь в маловодные периоды с максимально возможной производительностью  $0,6 \text{ м}^3/\text{с}$  и средней производительностью  $0,45 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $38,7 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$ ) в течение 60 суток. Так, например, основываясь на имеющихся рядах фактических наблюдений (1957–1995 гг.), в долине р. Лама может потребоваться включение компенсационного водозабора 14 раз за 38 лет. Однако максимальная производительность компенсационного водозабора может потребоваться лишь в наиболее маловодные и продолжительные по дефицитному периоду годы, т.е. всего 2 раза. В остальных случаях производительность компенсационного водозабора может оказаться значительно меньше максимального, что вообще исключит какой-либо ущерб стоку, в течение многих лет.

Вполне естественно, если основной водозабор будет заложен на подземные, а не на поверхностные воды, то участки основного и компенсационного водозабора должны быть либо разнесены вдоль реки, либо размещены на разных берегах реки, чтобы исключить взаимодействие водозаборов в моменты их совместной работы. Поэтому обоснование размещения компенсационных водозаборов должно включать расчеты его взаимодействия с основным.

Для получения максимальной проектной производительности водозабора в долине р. Ламы потребуется пробурить 70, а в долине р. Москвы – 37 эксплуатационных скважин.

Гидрографы поверхностного стока при работе таких водозаборов вполне очевидно изменятся. Результирующий гидрограф легко себе пред-



ставить, если на рисунке 4.3 исключить призму стока, соответствующего суммарному среднегодовому водоотбору (т.е.  $0,8 \text{ м}^3/\text{сек}$ ), то есть все точки графика сместятся вниз на  $0,8 \text{ м}^3/\text{сек}$ , но не ниже  $0,8 \text{ м}^3/\text{сек}$  (экологического стока, который должен быть сохранен в реке). В целом, таким образом, общий характер гидрографов сохранится. Следует также отметить, что 1–3 раза за сто лет могут реализоваться и более редко встречаемые маловодные годы (например 97 или даже 99% обеспеченности). Кстати, такие годы были встречены и в фактических рядах наблюдений в долине Ламы (1964, 1972). Продолжительность таких исключительно маловодных периодов не превышала месяца, а дефициты в них не превышали  $0,1 \text{ м}^3/\text{сек}$  по отношению к стоку 95% обеспеченности. Проектный компенсационный водоотбор в таких случаях может быть соответственно увеличен. Однако это несущественно скажется на сокращении экологического стока (всего на 1–2%). Тем не менее, допустимость такого сокращения стока должна предусматриваться и оцениваться с экологических позиций.

Существующие экологические исследования показывают, что такие кратковременные и редкие сокращения стока каких-либо экологических катастроф не вызывали.

Потенциальная возможность увеличения допустимого водоотбора в долинах малых незарегулированных рек в несколько раз показывает несомненную перспективность комбинированного использования поверхностных и подземных вод по сравнению с их раздельным использованием, что особенно важно при ограниченных водных ресурсах, соизмеримых с потребностью в воде в регионе.

Вместе с тем, вполне понятно, что при решении этого вопроса должна приниматься во внимание и экономическая целесообразность такого решения проблемы, что требует отдельного рассмотрения. В данном случае можно лишь заметить, что казалось бы довольно большое количество требуемых эксплуатационных скважин для создания компенсационных водозаборов не представляется чем-то далеким от реальности. В рассматриваемом примере это, как правило, не глубокие и не дорогие скважины, которые буровая бригада из 2-х человек и станка УГБ-50 может пробурить и оборудовать по 3–4 скважины в день. Несопоставима и протяженность требуемого компенсационного водозабора по сравнению с протяженностью трубопроводов от многих существующих централизованных водозаборов до водопотребителей.

В каждом конкретном случае этот вопрос должен решаться отдельно на основе технико-экономических расчетов и сопоставлении альтернативных вариантов.

Вместе с тем водно-ресурсные преимущества такого использования водного потенциала водосборов очевидны. Так, увеличение водоотбора на 0,26–0,6 м<sup>3</sup>/сек в долине малой реки, как показали приведенные выше примеры, позволит дополнительно обеспечить питьевой водой небольшой город с населением до 100–150 тыс. человек (при норме около 300 л в сутки на человека).

Регулирование меженного стока рек даже небольшими низконапорными плотинами или специальными инженерными гидротехническими сооружениями, способными исключить наиболее резкие кратковременные перебои или «провалы» стока, без создания водохранилищ, даст возможность еще более повысить коэффициент использования водных ресурсов таких водосборов.

## **4.2. Напорный водоносный горизонт с опосредованной гидравлической связью поверхностных и подземных вод**

Значительно более перспективным при комбинированном использовании поверхностных и подземных вод может в большинстве случаев оказаться форсированная эксплуатация напорных водоносных горизонтов. Главным преимуществом последних являются не редко значительно большие допустимые понижения, позволяющие получить более высокие производительности водозаборов, менее тесная гидравлическая связь с реками, позволяющая гасить дефициты стока большей продолжительности при отсутствии реальных ущербов поверхностному стоку, а также быстрая восстанавливаемость сработанных запасов подземных вод за счет упругих свойств водоносных систем и перетекания.

Опыт эксплуатации многочисленных водозаборов, использующих напорные водоносные горизонты показывает, что даже при постоянном наращивании водоотбора напоры водоносных горизонтов со временем стремятся к стабилизации. Это свидетельствует о наличии в большинстве случаев взаимосвязи водоносных горизонтов в зоне активного водообмена между собой и с реками. Картирование пьезометрических напоров даже в «классических» артезианских бассейнах, типа Московского, показывает, что основные области питания серии водоносных горизонтов вплоть до третьего-четвертого от поверхности земли располагаются на водораздельных пространствах, а их разгрузка осуществляется в долинах рек. Все это подтверждает, что даже в естественных условиях на водораздельных пространствах существует нисходящее движение подземных вод, а в долинах рек, наоборот, восходящее движение

подземных вод. Это свидетельствует о том, что практически повсеместно имеет место перетекание подземных вод через слабо проницаемые разделяющие слои. В условиях же эксплуатации водоносных горизонтов процесс перетекания не только интенсифицируется, но и, как известно, не редко меняет знак, что имеет место в долинах рек. Все это и предопределяет тенденцию к стабилизации напоров при эксплуатации подземных вод.

В этой связи расчеты производительности водозаборов, заложенных на напорные воды, особенно при кратковременном водоотборе в наиболее общем виде могут основываться на схеме «неограниченный пласт» с перетеканием. Для простоты расчетов водозабор, независимо от числа эксплуатационных скважин обычно схематизируется как «большой колодец» с произвольным площадным или линейным расположением скважин внутри «колодца».

Производительность такого водозабора ( $Q$ ) рассчитывается по уравнению [3, 4, 6]:

$$Q = \frac{4 \pi k \cdot m \cdot S_{\text{доп.}}}{2 \cdot \ln \frac{1,12 \cdot B}{R_0} + E_i \left( -\frac{a \cdot t}{B^2} \right)}, \quad (4.6)$$

где  $km$  – водопроводимость эксплуатируемого пласта, м<sup>2</sup>/сут;  $B$  – коэф-

фициент перетекания,  $B = \sqrt{\frac{k \cdot m \cdot m_0}{k_0}} = \sqrt{k \cdot m \cdot A_0}$ ;  $k_0$  и  $m_0$  – коэффициент

фильтрации и мощность разделяющего слабопроницаемого слоя,

$A_0 = \frac{m_0}{k_0}$ ;  $a$  – коэффициент пьезопроводности пласта, м<sup>2</sup>/сут,  $a = \frac{k \cdot m}{\mu^*}$ ;  $\mu^*$  –

упругая водоотдача пород;  $E_i$  – интегральная показательная функция;  $S_{\text{доп.}}$  – допустимое понижение пьезометрического уровня, м;  $R_0$  – радиус «большого колодца», м.

Радиус большого колодца при площадном расположении эксплуатационных скважин определяется по формуле  $R_0 = 0,16 \cdot P$ , где  $P$  – параметр площади размещения скважин, а при линейном расположении скважин по формуле  $R_0 = 0,2 \cdot l$ , где  $F$  – площадь расположения скважин, а  $l$  – длина ряда скважин.

При перетекании сверху и снизу, т.е. через кровлю и подошву пластов, коэффициент перетекания определяется по формуле:

$$B = \sqrt{\frac{k \cdot m}{\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_2}{m_2}}}, \quad (4.7)$$

Обычно, как известно, все основные расчетные гидрогеологические параметры оцениваются в интегральном виде по данным опытных откачек или опыту эксплуатации водозабора, либо подбираются на моделях, в том числе и коэффициент перетекания, т.к. определение и экстраполяция коэффициентов фильтрации разделяющих пластов ( $k_1$  и  $k_2$ ) затруднительны. В практических гидрогеологических расчетах также обычно используется схема «жесткого перетекания», не предусматривающая учета упругого режима разделяющих пластов и начального градиента фильтрации.

В связи с тем, что значение функции  $E$ , с увеличением времени эксплуатации подземных вод уменьшается и стремится к нулю, производительность водозабора постепенно перестает зависеть от времени. Именно с этого момента наступает стабилизация уровней при заданном водоотборе. Весь водоотбор определяется в этом случае только перетеканием и в итоге снижает прежде всего уровни грунтовых вод, их расходы и, тем самым, характеризует ущерб речному стоку.

Расчет производительности водозабора по уравнению 4.6, т.е. с учетом перетекания, предусматривает для простоты аналитического расчета условие постоянства уровней в водоносном горизонте, из которого осуществляется основное восполнение запасов подземных вод перетеканием. Обычно при этом имеются ввиду грунтовые воды, гидравлически связанные с реками. Такое условие во многих случаях вполне допустимо, особенно при расположении водозабора вблизи реки с наличием тесной гидравлической связи поверхностных и подземных вод, т.е. когда вызываемое перетеканием понижение уровней грунтовых вод может быть компенсировано подсосом воды из рек, а также перехватом расхода потока грунтовых вод к реке. Однако и в таких условиях перетекание может быть отождествлено в полной мере с ущербом речному стоку.

Стабилизации перетекания во времени может также способствовать некоторое увеличение питания грунтовых вод за счет сокращения испарения при снижении уровней грунтовых вод под влиянием эксплуатации. Сокращение испарения может быть в отдельных случаях довольно существенным, например, при неглубоком менее 1–1,5 м залегании уровней грунтовых вод от поверхности земли, что наблюдается в тыловых частях

террас и пойм, на переувлажненных землях. Особенно существенно этот процесс может проявиться в аридной зоне, где роль испарения в общем водном балансе велика.

Существуют различные приемы оценки изменений испарения в зависимости от изменений глубины залегания уровней грунтовых вод и климатических условий района. Наиболее простой из них был предложен С.Ф. Аверьяновым [38]:

$$W_z = E_0 \left( 1 - \frac{z}{z_k} \right)^n,$$

где  $W_z$  – интенсивность испарения с поверхности грунтовых вод (мм/год) на глубине  $z$  (м);  $E_0$  – потенциальная эвапотранспирация или максимально возможная испаряемость в данных климатических условиях, соответствующая испарению с водной поверхности, мм/год;  $z_k$  – критическая глубина залегания уровня грунтовых вод, при котором испарение практически прекращается (3–4 м);  $n$  – показатель степени, изменяющийся в зависимости от строения зоны аэрации от 1 до 3 и принимаемый обычно равным  $n = 2$ .

Зная площади понижения уровней грунтовых вод и откартировав их величины в изолиниях, можно рассчитать суммарное снижение испарения и равное ему приращение питания грунтовых вод, что позволит оценить способно или нет данное явление компенсировать водоотбор, исключить или снизить ущербы стоку.

Перетекание может и не повлиять на поверхностный сток особенно при кратковременном водоотборе и быстром восстановлении напоров за счет упругих свойств водоносного горизонта. Поэтому в каждом конкретном случае необходима оценка источников, слагающих перетекание, их количественная оценка и определение размеров возможного ущерба стоку за период эксплуатации.

Как известно, расчеты понижений уровней или производительности одиночных скважин по уравнению 4.6 показывают, что значение функции  $E_s(-x)$  довольно быстро (уже через несколько десятков суток) становится неспоставимым с первым членом знаменателя, что подтверждается и реальными наблюдениями. В этой связи расчеты эксплуатационных запасов подземных вод на продолжительные промежутки времени делаются, как правило, для стационарных условий, т.е. независимо от расчетного стока водоотбора. Для линейных же рядов скважин, для которых, собственно, и выведена данная формула Ф.М. Бочевеком, особенно при длине ряда, измеряемой километрами, а тем более при продолжительно-

стях водоотбора, измеряемых несколькими первыми месяцами, значение  $\ln \frac{1,12B}{R_0}$  становится не только сопоставимым с величиной  $E_i(-x)$ , но и может оказаться меньшим данной функции. В таблице 4.6 приведены значения соотношения  $2 \ln \frac{1,12B}{R_0} / Ei\left(-\frac{at}{B^2}\right)$  при некоторых характерных значениях коэффициента проницаемости ( $a$ ), коэффициента (фактора) перетекания ( $B$ ) и радиуса «большого колодца» водозабора ( $R_0 = 0,2l$ , где  $l$  – длина водозаборного ряда).

Таблица 4.6

Зависимость соотношения  $2 \ln \frac{1,12B}{R_0} / Ei(-x)$  от продолжительности эксплуатации

| $a$ ,<br>м <sup>2</sup> /сут | $B$ ,<br>м | $R_0$ ,<br>м | $2 \ln \frac{1,12B}{R_0} / Ei\left(-\frac{at}{B^2}\right)$ |        |        |         |         |
|------------------------------|------------|--------------|------------------------------------------------------------|--------|--------|---------|---------|
|                              |            |              | 30 сут                                                     | 60 сут | 90 сут | 120 сут | 150 сут |
| 10 <sup>4</sup>              | 5000       | 1000         | 0,31                                                       | 0,4    | 0,44   | 0,5     | 0,54    |
|                              | 10000      | 2000         | 0,60                                                       | 0,75   | 0,83   | 0,85    | 1,03    |
| 10 <sup>5</sup>              | 5000       | 1000         | 0,72                                                       | 1,1    | 1,50   | 3       | 5,4     |
|                              | 10000      | 2000         | 0,88                                                       | 1,13   | 1,35   | 1,5     | 1,8     |
|                              | 15000      | 3000         | 0,85                                                       | 1,05   | 1,30   | 1,4     | 1,6     |
| 10 <sup>6</sup>              | 10000      | 3000         | 1,1                                                        | 2,2    | 10     | 16      | 26      |

Как видно из таблицы 4.6, при малых значениях  $a$ ,  $B$  и  $t$  соотношение логарифма и  $E_i$  становится меньше единицы, а следовательно их разность и соответственно производительность водозабора (см. уравнение 4.6) получаются отрицательными, что абсурдно. Это означает, что в таких случаях данная зависимость неприемлема для расчета водоотбора, и перетекание при этом, можно считать, вообще отсутствует. Физический смысл этого явления можно объяснить так: чем меньше водопроницаемость пласта, тем медленнее развивается воронка депрессии и тем медленнее проявляется эффект перетекания (его стабилизирующая или компенсирующая водоотбор роль во времени). Поэтому производительность водозабора в таких случаях должна считаться для схемы изолированного пласта без перетекания. Перетекание же может учитываться в расчетах при соотношениях логарифма и функции  $E_i(-x)$  выше единицы. Разме-

ры же этого соотношения, как видно из таблицы, практически для всех наиболее вероятных продолжительностей внутри годовых маловодных периодов (от 30 до 150 суток) сопоставимы по величине, т.е. водоотбор во всех случаях все еще существенно зависит от времени и стабилизация уровней за это время не наступает. Лишь при коэффициенте пьезопроводности  $10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$ , то есть при сравнительно быстром развитии воронки депрессии, перетекание практически стабилизирует уровни уже при продолжительности водоотбора свыше трех месяцев.

Все это предопределяет необходимость учета продолжительности водоотбора в условиях напорных пластов с перетеканием и при расчетах производительности компенсационных водозаборов и при расчетах ущербов речному стоку.

Существует значительное число расчетных приемов оценки ущербов речному стоку для различных природных условий, предусматривающих различную степень совершенства (вреза) реки и граничных условий пласта [6, 37, 44, 63, 76]. Приведем лишь два из таких приемов, наиболее приемлемых для рассматриваемой расчетной схемы.

Ущерб поверхностному стоку на любой момент времени до наступления стабилизации уровней в условиях несовершенной узкой реки с постоянным уровнем и двухслойным строением водовмещающей толщи, когда эксплуатируемый напорный водоносный пласт перекрыт менее проницаемым слоем без четкого водоупора на границе раздела, оценивается по уравнению (4.8):

$$V = 0,5Q \cdot \left[ \exp \left( \frac{L + \Delta L}{B} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{L + \Delta L}{2\sqrt{at}} - \frac{\sqrt{at}}{B} \right) + \exp \left( \frac{L + \Delta L}{B} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{L + \Delta L}{2\sqrt{at}} + \frac{\sqrt{at}}{B} \right) \right]; \quad (4.8)$$

где  $B$  – коэффициент перетекания (принимается в расчете равным 5000 м);  $L + \Delta L$  – расчетное расстояние до реки, м;

$$\Delta L = \sqrt{(km)_n} \cdot \frac{m_a}{k_a} \cdot \operatorname{cth} \frac{2b}{\sqrt{(km)_n} \cdot \frac{m_a}{k_a}}; \quad a = \frac{(km)_n}{\mu_b + \mu_n}; \quad (km)_a \text{ и } (km)_n - \text{водопроницаемость слабопроницаемого верхнего и эксплуатируемого нижнего}$$

слоев;  $k_a, k_n, m_a, m_n, \mu_a, \mu_n$  – коэффициенты фильтрации, мощности и водоотдача верхнего и нижнего слоев.

При трехслойном строении водовмещающей толщи, то есть при наличии двух водоносных горизонтов (верхнего – грунтовых вод и нижнего – напорного, разделенных слабопроницаемым слоем) с перетеканием расчет ведется по зависимости (4.9):

$$V_{\text{ущ.}} = Q \cdot \left[ \operatorname{erfc} Z - \exp \left( \lambda + \frac{\lambda^2}{4Z^2} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left( Z + \frac{\lambda}{2Z} \right) \right]; \quad (4.9)$$

$$\text{где } Z = \frac{l_0}{2\sqrt{a^* \cdot t}}; \quad \lambda = \frac{\left( \frac{T_a}{T_n} \right) \cdot l_0}{\left( 1 + \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \right) \cdot (B^* + \Delta L)}; \quad a^* = \frac{T_a + T_n}{\mu_a + \mu_n};$$

$$B^* = \sqrt{\frac{T_a \cdot T_n}{(T_a + T_n) \cdot B_L}}; \quad B_L = \frac{k_0}{m_0}; \quad T_a \text{ и } T_n - \text{коэффициенты водопроводимости}$$

соответственно верхнего и эксплуатируемого нижнего водоносных горизонтов, м<sup>2</sup>/сут;  $\mu_a$  и  $\mu_n$  – гравитационная водоотдача верхнего и упругая водоотдача пород эксплуатируемого водоносного горизонта;  $k_0$  и  $m_0$  – коэффициент фильтрации и мощность разделяющего слабопроницаемого слоя, м/сут и м;  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты соответственно уровня и пьезопроводности верхнего и нижнего пластов, м<sup>2</sup>/сут.

В целях обоснования возможностей покрытия дефицитов стока в рассмотренных выше долинах рек Подмосковья за счет эксплуатации напорного горизонта с перетеканием приведем пример также гипотетического расчета ущерба стоку по уравнению 4.9 также при характерных для данного региона расчетных гидрогеологических параметрах. В том числе для расчетов в дополнение к вышеприведенным параметрам были приняты следующие значения параметров эксплуатируемого водоносного горизонта водопроводимость пласта ( $T = km$ ) – 500 м<sup>2</sup>/сут, пьезопроводность пласта ( $a$ ) – 10<sup>5</sup> м<sup>2</sup>/сут, перетекание ( $B$ ) – 5000 м и 10000 м, длина водозаборного ряда ( $l$ ) – 5 и 10 км и соответственно радиусы «большого колодца» – 1000 м и 2000 м, допустимое понижение, (равное величине напоров) – 30 м. Следует отметить, что по данным разведочных работ, выполненных в Подмосковье, величина  $km$  первого от поверхности напорного водоносного горизонта карбона колеблется в широких преде-



лах от 250 до 2800 м<sup>3</sup>/сут с преобладающими значениями в пределах 800–1000 м<sup>3</sup>/сут. Поэтому выбранное для оценочных расчетов величина этого основного расчетного параметра  $kt$  может рассматриваться как ниже средней. Параметры верхнего горизонта грунтовых вод приняты аналогичными в приведенных выше расчетах.

Результаты расчетов вероятной производительности водозабора приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Пример расчета производительности водозабора  
при характерных для данного региона расчетных гидрогеологических параметрах

| Продолжи-<br>тельность<br>эксплуа-<br>тации,<br>сут | $B=5000$ м                        |                              |                                   |                              | $B=10000$ м                       |                              |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|                                                     | $R_0=1000$ м                      |                              | $R_0=2000$ м                      |                              | $R_0=2000$ м                      |                              |
|                                                     | $Q$ ,<br>тыс. м <sup>3</sup> /сут | $Q$ ,<br>м <sup>3</sup> /сек | $Q$ ,<br>тыс. м <sup>3</sup> /сут | $Q$ ,<br>м <sup>3</sup> /сек | $Q$ ,<br>тыс. м <sup>3</sup> /сут | $Q$ ,<br>м <sup>3</sup> /сек |
| 30                                                  | 108,3                             | 1,26                         | 495,8                             | 5,7                          | 392,5                             | 4,5                          |
| 60                                                  | 81,2                              | 0,94                         | 196,25                            | 2,27                         | 165,2                             | 1,92                         |
| 90                                                  | 71,0                              | 0,82                         | 148,3                             | 1,7                          | 123,9                             | 1,44                         |
| 120                                                 | 66,8                              | 0,77                         | 129,1                             | 1,49                         | 105,8                             | 1,23                         |
| 150                                                 | 63,8                              | 0,74                         | 118,4                             | 1,37                         | 95,1                              | 1,1                          |
| ∞                                                   | 55,4                              | 0,64                         | 92,35                             | 1,07                         | 54,76                             | 0,635                        |

Как видно из таблицы 4.7 даже относительно форсированная сработка напора в течение наиболее неблагоприятного по продолжительности маловодного периода равного 5 месяцам, не только гарантированно покрывает рассчитанные дефициты стока в долинах рек Лама и Москва (см. табл. 4.3), но и оставляет возможности существенного наращивания эксплуатационных запасов подземных вод. Если же учесть, что водопроницаемость пластов первого от поверхности напорного водоносного горизонта в зависимости от степени его закарстованности может быть в 2–5 раз выше принятых в данном гипотетическом расчете величины, то и производительность водозаборов может соответственно быть увеличена. Другими словами, возможности напорных водоносных горизонтов в долинах малых рек при подобной форсированной кратковременной эксплуатации могут намного превосходить и расходы самих рек и тем более допустимые сокращения поверхностного стока.

Важным при этом становится лишь вопрос о допустимости ущербов стоку при такой эксплуатации и гарантированности восполнения сработанных запасов до очередного маловодного периода.

В этой связи для решения этого вопроса был выполнен расчет ущерба стоку по зависимостям (4.9). Дополнительно к вышеперечисленным с учетом опыта разведок были заданы следующие расчетные параметры в – половина ширины реки – 15 м,  $B$  – коэффициент перетекания – 5000 м.  $A_0 = m_0/k_0$  – показатель сопротивления разделяющего слоя –  $10^5$  сут. Средняя производительность компенсационных водозаборов принята максимально возможной из обоснованных выше (см. табл. 4.3) при наиболее продолжительном дефицитном периоде, т.е.  $Q = 0,3$  м<sup>3</sup>/сек или 25,8 тыс. м<sup>3</sup>/сут и  $t = 150$  сут (вариант 3б) для р. Москвы и 0,4 м<sup>3</sup>/сек или 34,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут и  $t = 90$  суток для р. Ламы (вариант 4б). Принимая во внимание то, что в напорных горизонтах региона, сложенных карбонатными отложениями, отмечается закономерность увеличения фильтрационных свойств пород вблизи рек, а также учитывая большую по сравнению с грунтовыми водами изолированность этих горизонтов от рек, проектные водозаборы заложены в два раза ближе к реке, чем для расчетов водоотбора из грунтовых вод, т.е. на расстоянии 300 и 500 м.

Ущерб стоку при заданных параметрах и расстоянии водозабора от реки в 300 м составил по р. Ламе 4,8% от минимального среднемесячного стока, а по р. Москве 6%. Смещение водозабора на расстояние 500 м от реки в долине р. Москвы несущественно снизило размер ущерба (всего на две сотых от водоотбора), что определяется довольно быстрым развитием воронки депрессии в напорных условиях. В этой связи, принимая во внимание отмеченный выше фактор улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород в приречной зоне, удаление водозабора свыше 500 м нецелесообразно. Полученный же несколько завышенный ущерб стоку по сравнению с условно заданным пределом и в этом случае оказался не очень существенен и находится практически в пределах точности гидрогеологических расчетов.

Для получения требуемого среднего за расчетный срок компенсационного водоотбора в долине р. Ламы в соответствии с уравнением 4.6 потребуется понижение напора всего на 7 м, а в долине р. Москвы на 5 м, т.е. более чем в 4–5 раз менее допустимого. Более высокие возможности напорных водоносных горизонтов казалось бы открывают перспективы для организации водозаборов с производительностью в 3–4 раза превышающей потенциальные эксплуатационные запасы подземных вод. Однако, необходимо иметь в виду, что это неизбежно приведет к недопустимым ущербам стоку, которые итак находятся на пределе возможного (6%).

Стратегия совместного использования поверхностных и слабо связанных с ними напорных вод должна быть идентичной таковой при использовании только грунтовых вод. Водоотбор и здесь должен осуще-

ствляться из двух водозаборных участков. Один из них – основной следует закладывать на грунтовые или тесно связанные с рекой напорные воды, а в отдельных случаях одновременно на те и другие в непосредственной близости от реки, где фильтрационные свойства горизонтов максимальные и где взаимосвязь с рекой наиболее тесная. Такой водозабор может отбирать как показывают расчеты в долине р. Ламы 0,8 м³/сек в течение 9 месяцев, а в долине р. Москвы 0,39 м³/сек в течение многоводных 8 месяцев. Стабилизация уровней подземных вод на таких водозаборах произойдет при водоотборе из напорных вод максимум через 200–250 суток (то есть в пределах маловодного года) за счет перетекания, обеспечиваемого ущербом реке и грунтовым водам, а в конечном итоге опять же поверхностному стоку. Понижение уровней при стабилизации в долине р. - Москвы составит почти в 2 раза меньше допустимого (18 м), а в долине р. Ламы лишь несколько больше допустимого (37 м). Радиус воронки депрессии достигнет при этом 5–6 км ( $R = 1,12 \cdot B$ ).

В маловодные годы в периоды, когда расходы в реках будут снижены соответственно до 1,6 м³/сек в р. Лама и 0,8 м³/сек в р. Москве производительность этих водозаборов должна быть снижена соответственно до 0,2 м³/сек и до 0,13 м³/сек, Одновременно должен включаться второй водозабор – компенсационный с средней производительностью соответственно 0,4 м³/сек и 0,23 м³/сек, который может функционировать максимально 90 суток и 120 суток. Режим работы этих водозаборов также должен определяться режимом поверхностного стока, т.е. должен быть пропорциональным изменениям глубины перебоев стока (дефицитам) и снижению производительности основного водозабора. Для исключения взаимодействия основного и компенсационного водозаборов они должны быть разнесены вдоль реки минимум на 6 км, т.е. на расстояние радиуса влияния компенсационного водозабора при его максимально возможной продолжительности работы ( $R = 1,5 \cdot \sqrt{a \cdot t}$ ).

Сокращение производительности основного круглогодичного водозабора в маловодные периоды приведет к частичному восстановлению пьезометрических уровней подземных вод, сокращению перетекания и соответствующего ущерба стоку. Полное или вернее практически полное восстановление уровней подземных вод на основном водозаборе может произойти, как показывает опыт эксплуатации, лишь в периоды паводков, когда резко возрастают градиенты нисходящей фильтрации по всей заливаемой площади поймы.

Условие постоянства уровней в водоносном горизонте, из которого осуществляется перетекание, при отсутствии факторов, способствующих

этому, может и не сохраняться, особенно при достаточно продолжительном периоде эксплуатации и значительном размере водоотбора. В этом случае воронки депрессии в районе компенсационного водозабора и, прежде всего, в условиях двухслойного пласта будет развиваться до тех пределов, пока осуществляемый водоотбор не будет уравновешен естественным инфильтрационным питанием подземных вод. Так, например, для водоотбора в  $0,8 \text{ м}^3/\text{сек}$  в долине Ламы при модуле питания подземных вод  $3,5 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  потребуется площадь воронки депрессии в  $228 \text{ км}^2$ , т.е. при радиусе воронки депрессии  $8,5 \text{ км}$ . Такой радиус воронки депрессии может сформироваться при отсутствии перетекания и принятом коэффициенте пьезопроводности  $a = 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$  за 260 суток. Таким образом, даже при таком наиболее жестком условии восполнение срабатываемых запасов подземных вод может обеспечиваться ежегодно, то есть будет постоянно гарантировано.

Для оценки гарантированности восполнения запасов подземных вод в данном случае использован средненоголетний модуль питания подземных вод, оцененный для данного региона по подземному стоку. В реальных же условиях питание горизонта в подобных природно-техногенных условиях будет больше, и соответственно восполнение будет осуществляться значительно быстрее. Это определяется, с одной стороны, тем, что при развитии воронки депрессии неизбежно вовлекается поверхностный сток.

Даже в период работы компенсационного водозабора, то есть в течение 3–5 месяцев, перехват стока, как показали оценки выше, может достигать 5–6% от меженных его величин. При отключении же этого водозабора в многоводные периоды, превышающие маловодные по продолжительности в 2–4 раза, река начинает восполнять образовавшуюся воронку депрессии. Этот процесс будет усилен как подземным стоком с водораздела, так и перераспределением напоров в водоносном горизонте.

Кроме того, как было показано выше, возможно увеличение инфильтрационного питания за счет снятия части испарения грунтовых вод при снижении уровней, а также отжатия воды из глин, фильтрационных потерь водоотбора на водосборе, неизбежного перетекания не только сверху, но и снизу.

Значительный и, в ряде случаев, основной вклад в восстановление напоров внесут и упругие запасы напорного водоносного горизонта. Все эти факторы существуют и создают многократную гарантию восполнения запасов. Вместе с тем трудности их реального количественного учета позволяет во многих случаях рассматривать их лишь как «запас прочности» оценок в выполняемых аналитических расчетах. В то же время все

эти факторы могут рассматриваться при численных решениях на моделях.

Восполнение запасов подземных вод на компенсационном водозаборе, работающем в упругом режиме фильтрации в трехслойном пласте, будет осуществляться практически за период равный продолжительности эксплуатации, то есть также будет происходить при заданном режиме водоотбора гарантированно ежегодно.

Таким образом использование напорных горизонтов с перетеканием представляется значительно более перспективным для систем комбинированного использования поверхностных и подземных вод по сравнению с грунтовыми водами как с точки зрения значительно большей потенциальной производительности водозаборов и более компактной в связи с этим конструкции водозаборных сооружений, так и с точки зрения более надежных источников восполнения запасов и сохранения качества подземных вод.

Использование водозабора в подобных условиях с непрерывным водоотбором на расчетный срок эксплуатации способно обеспечить в 1,5–7 раз меньшую отдачу, чем при комбинированном использовании (см. табл. 4.7). Периодическое восполнение запасов подземных вод в паводок создает еще больше предпосылок для наращивания водоотбора в условиях комбинированного использования по сравнению с традиционной эксплуатацией подземных вод.

### **4.3. Напорный водоносный горизонт, практически не взаимосвязанный с поверхностным стоком**

Как было отмечено выше, абсолютно не взаимосвязанных водоносных горизонтов между собой и реками в зоне активного водообмена практически нет. Опыт длительной эксплуатации напорных горизонтов в артезианских структурах и межгорных впадинах, данные региональных гидрогеологических и гидрологических исследований, результаты гелиевой съемки эксплуатируемых напорных горизонтов, а также результаты математического моделирования, выполненного для целей оценки эксплуатационных запасов централизованных водозаборов, неизменно показывают наличие перетекания и неизбежность со временем ущербов поверхностному стоку при эксплуатации даже третьего и четвертого от поверхности напорного горизонта. Взаимосвязь между горизонтами осуществляется за счет наличия фациальных гидрогеологических окон в разделяющих слабопроницаемых слоях, по зонам тектонических нарушений,

по палеодолинам, а также через сами разделяющие слои, несмотря на их нередко весьма низкие фильтрационные свойства (при  $A_0 > 10^6$ – $10^7$  сут). Поэтому влияние длительного водоотбора на поверхностный сток рано или поздно проявляется, хотя реально это влияние можно так или иначе зафиксировать лишь через многие годы, иногда более чем через 10–15 лет. Так, например, при моделировании водоотбора на Дубнинско-Вельском месторождении подземных вод при эксплуатации верхнекаменноугольного водоносного горизонта, залегающего на глубине свыше 40 м под толщей московской морены и в значительной части под юрскими глинами мощностью до 10 м и более, был оценен суммарный ущерб речному стоку через 10 лет в размере 65% от водоотбора, а через 25 лет – в размере 85% от водоотбора. При этом, в первом случае перехват транзитного речного стока составил 20%, а перехват питания при разгрузке подземных вод в реку 45% водоотбора. Во втором случае эти цифры составили соответственно 30% и 50%.

В этой связи работа компенсационного водозабора, функционирующего в условиях относительно изолированного напорного пласта лишь несколько месяцев в году, не может проявиться на поверхностном стоке, и оценки ущербов последнему в таких условиях можно не производить.

Основными вопросами оптимизации водоотбора в подобных условиях являются:

- оценка максимально возможной производительности водозабора при форсированной эксплуатации продолжительностью, равной вероятным маловодным периодам и главное
- оценка гарантированности восполнения сработанных эксплуатационных запасов подземных вод до очередного маловодного периода.

Оценка производительности водозабора может осуществляться в подобных условиях для схемы неограниченного изолированного пласта. Водозабор также может рассматриваться как «большой колодец». Расчет производительности водозабора ведется по уравнению (4.10.):

$$Q = \frac{4 \pi k m S_{\text{доп.}}}{-Ei\left(\frac{R_0^2}{4at}\right)} \text{ или при } \frac{r_0^2}{4at} < 0,1, Q = \frac{4 \pi k m S_{\text{доп.}}}{\ln \frac{2,25at}{R_0^2}}; \quad (4.10)$$

где все обозначения прежние.

Так, используя принятые выше для прикидочных расчетов параметры ( $km = 500 \text{ м}^2/\text{сут}$ ,  $S_{\text{доп}} = 30 \text{ м}$ ,  $a = 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$ ,  $R_0 = 1000 \text{ м}$ ) можно получить следующие значения производительности водозаборов, при сработке

Таблица 4.8

**Зависимость производительности водозабора от срока сработки напора  
эксплуатируемого водоносного горизонта**

| $Q$                      | Время (t), сут. |      |      |      |      |       |
|--------------------------|-----------------|------|------|------|------|-------|
|                          | 30              | 60   | 90   | 120  | 150  | 10000 |
| тыс. м <sup>3</sup> /сут | 99,2            | 72,5 | 62,8 | 57,1 | 53,8 | 18,8  |
| м <sup>3</sup> /сек      | 1,1             | 0,84 | 0,73 | 0,66 | 0,62 | 0,22  |

напора в 30 м за сроки вероятных, как было показано выше, маловодных периодов от 30 до 150 суток (табл. 4.8).

Сопоставляя таблицы 4.3 и 4.8 можно заключить, что компенсационный водозабор, заложенный на напорный горизонт с практическим отсутствием в период эксплуатации гидравлической взаимосвязи поверхностных и подземных вод, способен с большим запасом погасить дефициты стока, возникающие в долине Ламы при среднегодовом стоке в 1,8 м<sup>3</sup>/сек, а в долине Москвы 1,05 м<sup>3</sup>/сек. При увеличении допустимого понижения, достигающего не редко 50–60 м, эти запасы могут быть практически удвоены. Однако и без этого появляется возможность увеличить потенциальные эксплуатационные запасы подземных вод в данных долинах более чем в 5 раз, то есть еще больше, чем при водоотборе из грунтовых и напорных вод с перетеканием.

Подобная потенциально высокая способность напорного водоносного горизонта покрывать дефициты стока продолжительностью до 90–150 суток казалось бы открывает возможность увеличить в данном случае расчетный среднегодовой сток еще на одну величину, кратную естественным потенциальным эксплуатационным ресурсам из принятых выше вариантов водоотбора (см. табл. 4.5). Однако следует иметь в виду и то, что при этом возрастут и продолжительность маловодных периодов и, главное, продолжительность восполнения сработанных запасов подземных вод.

Полной гарантией стабильной многолетней работы компенсационных водозаборов в таких условиях может служить лишь такой водоотбор, при котором восстановление напоров будет осуществляться ежегодно, то есть продолжительность цикла снижение – восстановление пьезометрических уровней не будет превосходить одного года. Только в этом случае новый цикл не будет накладываться на недовосстановленный предыдущий и не определит тем самым тенденцию к истощению запасов подземных вод.

Как уже отмечалось выше, согласно теории упругого режима водоносных пластов, продолжительность восстановления пьезометрических

напоров практически эквивалентно продолжительности эксплуатации подземных вод. Характер восстановления уровней описывается уравнением Хорнера [5]:

$$S = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{T+t}{t}, \quad (4.11)$$

где  $T$  – продолжительность водоотбора и  $t$  – продолжительность восстановления уровней.

Расчет основан на принципе суперпозиции, предусматривающем, как уже говорилось, как бы включение нагнетательного водозабора в момент отключения компенсационного водозабора с равной ему производительностью. На рисунке 4.4 приведены примеры графиков снижения и восстановления пластового давления при прогнозном водозаборе в долинах рек Лама и Москва в течение 90 суток и 150 суток. Некоторое недо-восполнение уровней подземных вод за сроки  $t = T$ , объясняется инерцией системы, то есть продолжением какое-то время снижения уровней подземных вод по краям воронки депрессии и после того, когда откачка была остановлена и вблизи водозабора уже началось восстановление пластового давления.

Полное восстановление напоров теоретически может продолжаться бесконечно. Однако в условиях не абсолютно изолированного пласта,

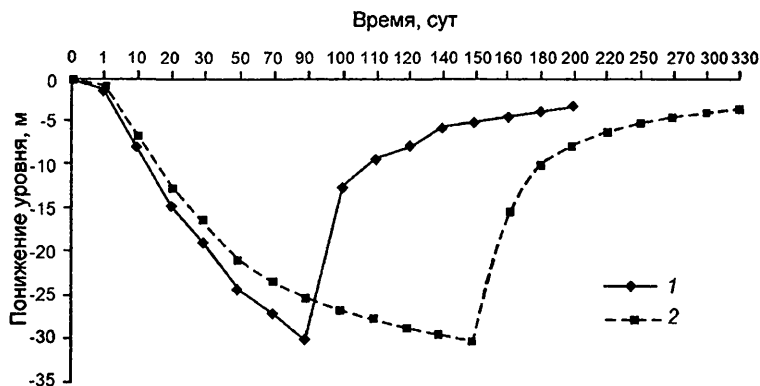


Рис. 4.4. График сработки и восстановления напоров при продолжительности дефицитных периодов 90 и 150 суток (при водоотборе 1 – 62,8 тыс. м³/сут и 2 – 53,8 тыс. м³/сут)



что характерно для зоны активного водообмена, полному восстановлению напоров будет способствовать перетекание. Поэтому для практических оценок периодичности включения водозаборов можно вполне принимать  $t = T$ .

Как видно из рисунка, цикл снижение–восстановление напоров при водоотборе в 62,8 тыс. м<sup>3</sup>/сут и 53,8 тыс. м<sup>3</sup>/сут практически не превосходит годового гидрологического цикла. Увеличение же продолжительности маловодного периода в долине р. Москвы даже на один месяц приведет к тому, что восстановление напоров может не завершиться к очередному маловодному циклу или к началу серии последующих маловодных циклов, если они сгруппируются подряд, что в ряде случаев не может быть признано целесообразным.

Выбор в качестве критерия, лимитирующего продолжительность цикла снижения–восстановления уровней в пределах года, определяется необходимостью предвидеть возможность группирования маловодных лет. Лишь в этом случае можно рассчитывать, что подобное включение компенсационного водозабора может осуществляться ежегодно и лишь в таком случае можно гарантировать полное восстановление уровней до очередного маловодного периода.

Более того, при 4–5-кратном увеличении эксплуатационных запасов подземных вод, по сравнению с минимальными потенциальными, например, при среднегодовом расходе поверхностных вод свыше 1,6м<sup>3</sup>/сек в долине р. Ламы, могут появиться в отдельные годы по два маловодных периода (зимний и летний, таблица 4.9).

В результате, необходимо предусматривать хотя и редкие, но тем не менее возможные сокращения периодов восстановления до 3 месяцев. В приведенном выше примере расчета такая ситуация предусмотрена и

Таблица 4.9

Продолжительность и величина дефицитных периодов в долине р. Лама

| Годы | Маловодные месяцы | Дефицит стока, м <sup>3</sup> /сек | Средний водоотбор в серии, м <sup>3</sup> /сек |
|------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1967 | Февраль           | 0,19                               |                                                |
|      | Июль              | 0,60                               |                                                |
| 1972 | Февраль           | 0,5                                |                                                |
| 1973 | Июль              | 0,05                               | 0,19                                           |
|      | Август            | 0,33                               |                                                |
|      | Январь            | 0,44                               | 0,4                                            |
|      | Февраль           | 0,36                               |                                                |
|      | Июнь              | 0,47                               | 0,42                                           |
|      | Июль              | 0,35                               |                                                |

условия полного восстановления уровней соблюдены (см. рис. 4.4). В тех же случаях, когда такого условия не удастся соблюсти, очередная сработка напоров может начаться от недовосстановленных уровней и соответственно понижение при очередной сработке напоров может превысить допустимое. Тем не менее, подобная ситуация далеко не всегда может оказаться критической. Прежде всего условие сработки только напора горизонта является оптимальным, но далеко не строгим. Частичная сработка емкости пласта (тем более лишь периодически) вполне возможна. Кроме того, недовосстановление уровней может возникнуть лишь тогда, когда дефициты стока в последующих сериях будут равными предельно рассчитанным как по объемам, так и по продолжительностям (что далеко не всегда может произойти). Так, в приведенном примере средний дефицит стока в 1973 г. хотя и близок к предельно оцененному, но продолжительности маловодных серий составили всего по 60 суток, вместо предельных расчетных 90 суток. Интервалы же между маловодными сериями в период 1972–1974 гг. составляют 3 месяца и более. Поэтому полное восстановление уровней подземных вод произойдет и в этом случае. Более жестких условий для восполнения запасов подземных вод за период имеющихся наблюдений в приведенных примерах встречено не было. Тем не менее такие ситуации должны учитываться.

Кроме того, как показали приведенные выше оценки, во многих случаях потенциальные возможности напорных горизонтов могут оказаться значительно выше требуемых для погашения дефицитов стока, когда в допустимых понижениях может сформироваться значительный запас, который и может быть реализован для погашения случайно возникающих как бы сверхнормативных дефицитов стока.

Для отбора рассчитанного максимально возможного количества воды в долине Ламы и при использовании для компенсации дефицитов стока слабосвязанных с рекой напорных вод также потребуются создание двух водозаборов. Один из них основной на грунтовые или напорные воды, гидравлически взаимосвязанные с рекой, работающий круглогодично с производительностью в  $1 \text{ м}^3/\text{сек}$  при расходах в реке свыше  $1,8 \text{ м}^3/\text{сек}$  с сокращением водоотбора в маловодные периоды в среднем до  $0,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Второй водозабор – компенсационный, работающий на напорных водах, не взаимосвязанных с рекой, только в маловодные периоды с средней производительностью  $0,8 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

В долине р. Москвы основной водозабор может отбирать округленно  $0,5 \text{ м}^3/\text{сек}$  при расходах поверхностного стока свыше  $1,05 \text{ м}^3/\text{сек}$  с сокращением водоотбора в маловодные периоды в среднем до  $0,13 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Компенсационный водозабор будет включаться только в маловодные

периоды со средней производительностью  $0,3 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а в периоды отключения основного водозабора с производительностью до  $0,4 \text{ м}^3/\text{сек}$ , что также возможно.

Вероятностный анализ многолетних рядов наблюдений показывает, что полное отключение основных водозаборов может потребоваться не чаще 3 раз за 100 лет и сроком не более одного месяца, то есть когда могут появиться исключительно редкие по маловодности годы свыше 97% обеспеченности.

Основные водозаборы во всех случаях предпочтительнее сооружать на подземные воды вдоль рек в виде инфильтрационных водозаборов на грунтовые или неглубоко залегающие напорные воды с наличием перетекания и гидравлической связи с рекой. Однако, при условии если пропускная способность ложа реки не в состоянии обеспечить перехват проектного водоотбора из реки экологически целесообразным инфильтрационным водозаборным сооружением, водозаборы придется закладывать непосредственно на поверхностные воды или организовывать искусственное восполнение запасов подземных вод. Компенсационные водозаборы закладываются в данных условиях на напорные воды либо в непосредственной близости от основного (при достаточно надежных разделяющих слоях), либо для гарантии исключения взаимодействия с основным водозабором за пределами радиуса влияния компенсационного водозабора, в данном примере на расстоянии 5–6 км от основного.

Таким образом, гидрогеологические условия, характеризующиеся практическим отсутствием гидравлической связи поверхностных и подземных вод в период работы компенсационного водозабора, являются наиболее благоприятными, дающими наибольший выигрыш при совместном использовании поверхностных и подземных вод по сравнению с отдельным их использованием.

В условиях рассматриваемого режима комбинированной эксплуатации поверхностных и подземных вод потенциальные эксплуатационные запасы (или ресурсы) подземных вод в приведенных примерах могут быть не только увеличены более чем в 5 раз, но и подобная система использования водных ресурсов может осуществляться неограниченно долго с допустимыми ущербами поверхностному стоку и следовательно с минимальными негативными экологическими последствиями. Соответственно, возрастает и коэффициент возможного использования водных ресурсов водосбора в целом.

Как было указано выше, эксплуатация подземных вод может быть организована и при комплексировании вышеперечисленных расчетных схем, т.е. при одновременном использовании грунтовых и изолирован-

ных напорных вод или напорных вод с перетеканием и без него. Для покрытия значительных дефицитов стока и при достаточно продолжительных маловодных сериях можно также создавать два компенсационных водозабора на первый и второй напорные горизонты и включать их последовательно с таким расчетом, чтобы на каждом из них не был превышен допустимый предел для ежегодного восстановления напоров. Принципиально методология оптимизации водоотбора при этом не отличается от описанной выше. Конкретные примеры такого комплексирования водоотбора будут приведены ниже.

Приведенные выше примеры расчетов, хотя и выполнены не на базе конкретных данных разведок подземных вод, осуществлены все-таки по достаточно реальным природным расчетным гидрогеологическим параметрам, взятым в наибольшей мере по материалам гидрогеологических исследований и разведок месторождений подземных вод в Московском регионе. Однако аналогичные природные условия могут встречаться и во многих других регионах России, что позволяет рассматривать полученные результаты оценок приемлемыми и во многих других случаях и вполне возможно с намного большим эффектом, чем в приведенных выше примерах, т.к. принятые для расчетов параметры были далеко не самые оптимальные и, как правило, ниже средних значений. Более того, для большей части Московского региона отмечаются небольшие положительные тренды как в среднегодовых, так и минимальных характеристиках стока, связанные и с техногенными факторами, и с климатическими изменениями. Это предопределило то обстоятельство, что и абсолютные минимальные среднемесячные значения стока, и объемы дефицитов стока установлены по периодам 20–30-летней давности, не наблюдаемым в последние десятилетия. Все это позволяет предположить, что заложенные в основу расчетов критерии являются более жесткими по сравнению с сложившимися современными техногенно-климатическими условиями в регионе. Все эти аспекты, в том числе и методы их решения, будут подробно рассмотрены ниже при анализе конкретных примеров.

Интересно также отметить, что полученные соотношения возможно-го увеличения эксплуатационных запасов подземных вод по сравнению с минимальными потенциальными запасами практически совпадают с соотношением среднегодовых многолетних и минимальных годовых среднемесячных модулей подземного стока. В долине р. Ламы последнее соотношение равно 4,5, а в долине р. Москвы – 5,5. В различных гидрогеологических районах это соотношение изменяется в довольно широких пределах от 2,5 до 15,0. Поэтому, если считать эти соотношения показательными (так как минимальные модули лежат в основе оценок мини-

мальных потенциальных эксплуатационных ресурсов, а среднемноголетние модули – в основе гарантированности восполнения запасов), то можно оценить предполагаемые потенциальные возможности наращивания эксплуатационных запасов подземных вод при комбинированном использовании поверхностных и подземных вод в различных природных условиях.

В этой связи для обоснования надежности функционирования систем совместного использования поверхностных и подземных вод актуальным становится оценка как минимальных меженных, так и среднегодовых естественных ресурсов подземных вод, которые в долинах малых водозаборов с незначительным транзитным речным стоком могут стать соответственно основным критерием для определения нижнего и верхнего пределов допустимого отъема стока и, одновременно, гарантированности восполнения запасов подземных вод.

Выполненные, возможно, далеко не самые оптимистические, оценки повышения коэффициента использования водных ресурсов убедительно показывают несомненные водно-ресурсные преимущества совместного использования поверхностных и подземных вод.

Вместе с тем важными представляются и другие, прежде всего экологические и экономические, преимущества совместного использования поверхностных и подземных вод.

---

## *Глава 5*

# **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Рассмотренные выше воднобалансовые преимущества или более широкие перспективы рационального использования водных ресурсов при комбинированном использовании поверхностных и подземных вод являются несомненно основными при рассмотрении альтернатив организации водоснабжения. Однако в ряде случаев сегодня не менее важными могут оказаться экологические и экономические аспекты в принятии подобных решений. Так, в последние годы не редки случаи значительных затяжек введения в строй уже разведанных месторождений подземных вод именно из-за сомнений прежде всего в их экологической обоснованности и экономической целесообразности. В этой связи представляется важным кратко рассмотреть и эти вопросы.

### **5.1. Экологические преимущества систем комбинированного использования поверхностных и подземных вод**

Одним из важнейших преимуществ комбинированного использования поверхностных и подземных вод является значительно меньшее и во многих случаях даже практическое отсутствие негативных экологических последствий по сравнению с длительной интенсивной эксплуатацией подземных вод, осуществляемой в целях централизованного водоснабжения. Как известно, любое масштабное техногенное вмешательство в

среду и тем более использование земных недр и их полезных ископаемых, какими являются и подземные воды, неизбежно отражается на состоянии окружающей среды и наносит ей определенный и часто непоправимый ущерб. Вполне понятно, что в отдельных случаях, например, при ограниченном и рассредоточенном использовании подземных вод в том числе одиночными скважинами, колодцами и, тем более, при каптаже родников, какого-либо ущерба среде может быть практически и не нанесено. Вместе с тем влияние крупных централизованных водозаборов на среду во многих случаях не просто заметно, но и очевидно наносит значительные ущербы как геологической и экологической среде, так и хозяйству. В том числе неоднократно отмечались недопустимые изменения в водном и солевом балансе водоносных горизонтов, недопустимые ущербы поверхностному стоку, осушение низинных и сокращение верховых болот с последующим развеванием и самовозгоранием торфов, оседания земной поверхности, активизация карстово-суффозионных процессов, угнетение водных и наземных экосистем, изменения в криологических, почвенных и даже сейсмических процессах [26]. Таким образом, интенсивная эксплуатация подземных вод нарушает не только геологическую или костную (абиотическую) основу существования биоты, т.е. среду обитания человека (его экос-дом), но и нарушает как бы кровеносную систему биоты – состояние подземных вод, непосредственно определяющих жизнедеятельность биоты, включая и самого человека, без учета интересов которого все эти в целом экологические или социально экологические проблемы не имели бы никакого значения.

Возможно одним из главных достоинств систем совместного использования поверхностных и подземных вод с экологической точки зрения может быть названо значительное повышение доли использования поверхностного стока без его регулирования водохранилищами. Именно создание водохранилищ, в том числе и только питьевого назначения, определяет целый комплекс нежелательных последствий как в окружающей среде, так и в экономике. Водохранилища не редко заливают наиболее ценные пастбищные угодия, приуроченные к поймам рек, вызывают необходимость переноса населенных пунктов из зоны затопления и подтопления, приводят к подтоплению сельскохозяйственных земель, городов, активизируют карстовые и оползневые процессы, нарушают условия устоявшегося, часто уникального, рыбного воспроизводства, приводят к переработке берегов, требуют изменений инфраструктуры прибрежных территорий, связанных с значительными затратами и т.д. В результате далеко не всегда известные экономические преимущества создания водохранилищ могут быть оправданы издержками в окружаю-

щей человека среде и поэтому не всегда могут получить единодушную социальную поддержку. Комбинированное использование водных ресурсов может снять все эти негативные последствия и не редко полностью решить проблемы водоснабжения без создания водохранилищ питьевого назначения.

Помимо этого комбинированное использование водных ресурсов имеет и ряд других экологических преимуществ, связанных с изменением гидрогеологических условий.

Многочисленные примеры вышеперечисленных негативных последствий интенсивной эксплуатации подземных вод на окружающую среду как в нашей стране, так и за рубежом приведены в работе [26]. В этой связи здесь целесообразно остановиться лишь на особенностях таких последствий при относительно кратковременном водоотборе подземных вод в компенсационном режиме и соответственно на экологических преимуществах совместного использования поверхностных и подземных вод по сравнению с непрерывной длительной эксплуатацией подземных вод.

Одним из наиболее значимых отрицательных эффектов водоотбора является снижение стока рек до экологически недопустимых пределов. Чрезмерное сокращение стока приводит к снижению скоростей потоков, к заилению и зарастанию русел, промерзанию русел зимой и пересыханию их летом, изменению гидрохимического и биологического режима рек и как следствие нарушению жизнедеятельности водных экосистем, снижению уровней грунтовых вод и, как следствие, угнетению прибрежных наземных экосистем, ухудшению условий судоходства, энергетического использования рек, водообеспечения населения в связи с осушением водозаборных сооружений на реках и, наконец, ухудшение эстетического восприятия речных долин их использования в рекреационных целях.

Следует подчеркнуть, что перемерзание и пересыхание рек имеет место и в естественных условиях, преимущественно в криолитозоне и аридной зоне. Однако многовековой режим таких рек привел к адаптации и соответствующей трансформации водных и прибрежных наземных экосистем в таких долинах. Поэтому критические и недопустимые необратимые изменения могут произойти лишь в экосистемах, неадаптированных к такому коренным образом нарушенному режиму поверхностного стока.

Даже то положение, что в соответствии со статьей 133 Водного Кодекса Российской Федерации, использование водных объектов для питьевого и хозяйственно-питьевого назначения определяется приоритетным, не может допускать непоправимых ущербов среде и экологии. Это поло-



жение обозначает лишь преимущества в таком использовании воды по сравнению с другими, а не уничтожение реки как объекта живой природы.

Ущерб речному стоку при любом способе использования подземных вод неизбежны. Однако при комбинированном использовании величина ущерба специально рассчитывается и лимитируется условием непревышения отбора, приводящего к не допустимым изменениям в среде.

Вопрос о научном обосновании нормативных допустимых отъемов стока, к сожалению, до сих пор не получил еще своего должного решения.

Связано это прежде всего с трудностями учета многокритериальных экологических, санитарных, гидрологических и гидрогеологических требований, определяющих пределы допустимых ущербов поверхностному стоку при планировании централизованного водоснабжения. Особенно важны такие оценки вполне естественно в долинах малых рек с меженными расходами, соизмеримыми с потребностью в воде на водосборе. Принимая во внимание, что большинство водозаборов хозяйственно-питьевого назначения не превышают чаще всего 100–150 тыс. м<sup>3</sup>/сут, к категории малых рек можно отнести реки с меженными расходами порядка 1–1,5 м<sup>3</sup>/сек. Именно в долинах таких рек прежде всего возникает необходимость определения допустимого водоотбора и сохранения какого-то гарантированного экологического стока.

Исключением из подобного водохозяйственного подхода к определению понятия «малая река» могут стать реки криолитозоны и аридной зоны, где они перемерзают или пересыхают и где проблема сохранения экологического стока не стоит.

В соответствии со СНиП 2.04.02-84 обеспеченность среднемесячных расходов в поверхностном водоисточнике для большинства централизованных водозаборов первой категории (то есть для населенных пунктов численностью свыше 50 тыс.) не должна быть менее 95%. Подобная запись позволяет оценивать эксплуатационные запасы подземных вод на водозаборах инфильтрационного типа в размере минимального среднемесячного расхода реки 95% обеспеченности. Это означает, что в такой год, и тем более в годы меньшей обеспеченности, река может быть полностью осушена с соответствующими очевидными катастрофическими экологическими последствиями.

В этой связи возникает необходимость в определении необходимого обязательного остаточного экологического или минимально допустимого стока, либо так называемых санитарных или природоохраных попусков.

В настоящее время существуют различные подходы к оценке таких предельно допустимых отъемов стока и соответственно определения минимального остаточного стока в реках. Однако как правило все они не имеют четких научно обоснованных количественных критериев. Так, например, в практике ГКЗ СССР, а также в ряде других работ, условно принято считать допустимыми ущербы поверхностному стоку при эксплуатации подземных вод, не превышающими 25% от минимального среднемесячного стока 95% обеспеченности, т.е. остаточный сток в реке не должен быть менее 75% от минимального стока 95% обеспеченности. Такое положение никак не обосновано и тем более документально не затверждено. Б.В. Фашевский [66, 67] считает, что минимальный остаточный сток экологически значимых рек не может быть менее стока 99% обеспеченности с той же степенью аргументации. Помимо этого данный автор считает целесообразным определять не только минимальный годовой сток, но и весь гидрограф стока за возможный маловодный год, который не должен быть ниже расходов рек 99% обеспеченности по каждому из месяцев внутри года. Такой остаточный гидрограф, по мнению автора, позволит сохранить при водоотборе всю экосистему водосбора, т.е. водную и наземную растительность, фауну, почвы и т.д.

На реках средней экологической значимости допускается сокращение минимальных расходов воды на величину  $\sigma = 1 - Q_{\min 99\%} / Q_{\max 99\%}$ , где  $Q_{\min 99\%}$  – минимальный средний месячный расход воды в год 99% обеспеченности;  $Q_{\max 99\%}$  – тоже максимальный средний месячный расход. Это может составить по нашим оценкам до 50 и более процентов от минимального расхода реки за многолетие. Основное внимание автором было уделено процессам затопления пойм и сохранения рыбопродуктивности речных систем, сохраняя необходимые условия для нереста. Именно в связи с этим и аргументируется необходимость оценок предельного гидрографа рек.

А.Г. Каск с соавторами [20] рекомендуют при определении «безопасного» водоотбора из рек сохранять гидрограф стока, составленный по минимальным суточным расходам рек за весь период наблюдений. В зависимости от продолжительности наблюдений такой гидрограф естественно будет разным.

А.Г. Гриневич с соавторами [17] предлагают также строить лимитирующий гидрограф с учетом продолжительности стояния суточных расходов воды в течение года и распределения стока в маловодные годы для наиболее неблагоприятных условий.

Л.С. Язвин [78] считает возможным полное изъятие естественного стока, основываясь на отмеченной выше приоритетности его использо-

вания для водоснабжения, и лишь при необходимости планировать требуемые экологические попуски для экологически значимых рек. Как оценивать экологическую значимость рек и каковы должны быть такие попуски, не обосновывается.

Подобные крайние решения по-видимому тоже возможны в каких-то исключительных случаях, когда альтернативных источников водоснабжения нет, а вода жизненно необходима.

Д.Я. Раткович, наоборот, исходя из принципа, что за незнание надо платить, предлагает в качестве остаточного минимального стока принимать расход реки 75% обеспеченности, как достаточно часто встречающийся и не приводивший к каким-либо катастрофическим последствиям.

А.В. Яцык [79] считает необходимым при определении сохранения речных систем как объекта живой природы или элемента ландшафта учитывать следующие факторы:

1. Сохранение в речном потоке гидродинамического равновесия, обеспечивающего транспортирующую способность потока и процесса руслообразования. Применительно к меженным расходам рек требуется учет скоростей потока, исключающих заиление ( $< 0,1\text{--}0,25$  м/сек), зарастание русла ( $< 0,3$  м/сек), угнетение фито- и зоопланктона ( $< 0,5\text{--}0,6$  м/сек).

2. Сохранение благоприятного водного режима, обеспечивающего биологическую продуктивность водных экосистем, их санитарного состояния и способность самоочищения реки, оцениваемых по содержанию растворенного в воде кислорода ( $> 0,2$  мл/л при оптимуме 4–6 мл/л). Качество воды в экологическом стоке должно удовлетворять нормативам рыбохозяйственного назначения. Объем экологического стока должен обеспечивать способность экосистем к саморегулированию, самоочищению и самовоссозданию.

Подводя итоги, автор считает, что отбор стока не должен превышать 10–25%.

Э.А. Эйнор считает оптимальной для реофильных организмов скорость течения в  $0,2\text{--}0,5$  м/сек, не определяя, насколько и как долго можно снижать эти скорости. Основываясь лишь на продолжительности жизни ряда корневых растительных систем (не более 18 месяцев), автор полагает, что продолжительность перебойных периодов не должна превышать одного (маловодного) года и после этого обязательно необходимо иметь не менее 2 относительно многоводных лет. Подобных условий для других видов экосистем не определялось.

Как видно, существующие предложения по допустимым изъятиям стока с одной стороны достаточно разноречивы и субъективны, а с дру-

гой – разноплановы по критериям допустимости отбора стока. Все они в той или иной мере уязвимы, так как не учитывают прежде всего повторяемость и длительность маловодных периодов и следовательно способность экосистем выдержать серию таких периодов. Не учитывается также степень обжитости водосбора и, соответственно, степень загрязнения реки, ее воздействие на экосистему и требуемый при этом санитарный расход. Мало обоснованы и крайние суждения.

Исходя из всего вышесказанного, можно заключить, что универсального критерия для определения допустимого отъема стока, по-видимому, вообще дать невозможно, так как в каждом конкретном случае в качестве приоритетного фактора может быть выбран лишь один из вышеперечисленных.

Вместе с тем в любом случае минимальный сток рек является определенным граничным условием для планируемого стабильного во времени водоснабжения любых водозаборных сооружений и оптимальным было бы оценивать допустимость изъятий стока по максимально возможному комплексу параметров, определяющих сохранение реки как элемента живой природы.

Одним из основных достоинств комбинированного использования поверхностных и подземных вод, как альтернативы их разделному использованию, является возможность либо полного исключения ущербов меженному стоку рек, либо как минимум, гарантированность сохранения необходимого экологического стока даже при среднегодовом водоотборе, значительно его превышающем. Достичь такого результата позволяет возможность управлять этим процессом. Однако и в этом случае вопрос о экологически допустимых изъятиях стока не снимается. Вместе с тем в связи с отмеченной выше спецификой работы систем комбинированного использования поверхностных и подземных вод некоторые аспекты из оптимального комплексного обоснования допустимых изъятий стока могут быть исключены. В частности, выполненные выше экспертные оценки возможностей повышения отдачи малых водосборов за счет совместного использования поверхностных и подземных вод по ряду рек показали, что несмотря на увеличение водоотбора в 3–5 раз по сравнению с минимально допустимыми потенциальными эксплуатационными ресурсами поверхностных и подземных вод малой реки, этот водоотбор остается сравнительно небольшой по отношению к среднегодовому стоку даже маловодного года, а тем более он не сопоставим с расходами в паводковые периоды. В результате гидрограф внутригодового стока практически не меняется, лишь несколько снижаясь по уровням и расходам в многоводные периоды при сохранении требуемых меженных расходов.

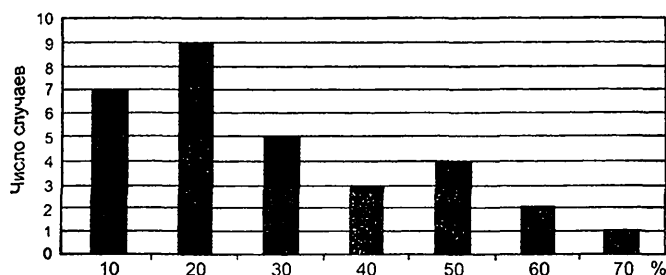
Тем не менее, повторяемость маловодных серий редкой вероятности может возрасти, что может потребовать изучения скоростей реабилитации экосистем, получающих стрессы в результате маловодности реки. В ряде случаев подобные стрессы могут быть несколько смягчены за счет того, что сброс в реки возвратных вод, достигающих иногда до 80–90% от водоотбора (за исключением безвозвратных потерь), как показывает опыт, приводит к росту меженных расходов рек. Таким образом многие вопросы, связанные, например, с продолжительностью заливания пойм в паводки, функционированием в это время водных и наземных экосистем, то есть сохранение условий для нереста, и др., могут быть сняты.

Тем не менее, основным вопросом здесь остается вопрос о допустимом суммарном водоотборе в бассейне реки, характеризующим потенциальные эксплуатационные ресурсы поверхностных и подземных вод с учетом особенностей динамичности стока, определяемой геологическим строением, ландшафтными и гидрогеологическими условиями.

Принимая во внимание трудность количественных экологических прогнозов, обусловленную слабой изученностью процессов, определяющих устойчивость водных и наземных экосистем при изменении внешних на них воздействий, в основу таких оценок на данном этапе может быть положен лишь принцип аналогий. В качестве такового могут быть использованы данные многолетних наблюдений за поверхностным стоком с оценкой зафиксированных или оцененных вероятностных минимальных расходов рек. Именно такие естественные минимальные расходы рек, как отмечалось и многими другими авторами, могут быть признаны предельными, при которых не происходило необратимых изменений в экосистемах, сформировавшихся и функционирующих на водосборе сегодня.

Исходя из такой предпосылки, а также принимая во внимание отмеченное выше требование СНиПа, в качестве допустимой сработки речного стока для большинства водозаборов (категория I), до тех пор пока проблема допустимых отъемов стока не будет решена на должном научном уровне, в качестве минимальных потенциальных ресурсов поверхностных и подземных вод, можно было бы принять разность между расходом 95% обеспеченности и расходом 99% обеспеченности. Последний может рассматриваться как базовой расход, хотя и редко встречаемый.

Анализ соотношений минимальных среднемесячных расходов рек по 31 малому водосбору Московского региона показал, что минимальные допустимые расходы рек (99% обеспеченности) меньше расходов 95% обеспеченности в довольно широких пределах и их соотношение состав-



**Рис. 5.1.** Гистограмма соотношений минимальных среднемесячных расходов рек 95 и 99% обеспеченности в процентах

ляет от 10 до 70%, но наиболее часто это соотношение составляет 20% от расходов 95% обеспеченности (рис.5.1).

Высокие значения процентов (свыше 40%) связываются здесь с сравнительно короткими (менее 30–40 лет) рядами наблюдений и соответственно определены не достаточно высокой точностью вероятностных оценок на концах графиков обеспеченности. Все это позволяет с определенной степенью гарантированности оценить предельно-допустимое сокращение поверхностного стока при региональных исследованиях в среднем на 20% от минимальных среднемесячных расходов 95% обеспеченности. Такой водоотбор позволит предотвратить катастрофичное нарушение экологического равновесия на водосборе, поскольку окружающая природа адаптирована к подобным изменениям и потому каких-либо непредвиденных последствий при этом можно не ожидать. Вместе с тем следует подчеркнуть, что в каждом конкретном случае при проектных решениях этот процент должен оцениваться отдельно, а указанный средний процент может быть использован главным образом для предварительных приближенных оценок.

Следует отметить, что на основании подобного подхода можно оценить лишь минимально возможные потенциальные эксплуатационные водные ресурсы. В условиях комбинированного использования поверхностных и подземных вод реальные эксплуатационные водные ресурсы могут быть оценены в значительно больших размерах, т.к. в качестве расчетного среднегодового водоотбора, как было показано выше, может быть принят расход не 95% обеспеченности, а какой-то иной более высокой обеспеченности.

Для многих средних рек, не говоря о крупных, с минимальными расходами стока, измеряемыми десятками кубометров в секунду, то есть

намного превышающими реальными производительности водозаборов, идентичный подход вряд ли может быть оправданным. Здесь на первый план могут выходить совсем другие, не экологические ограничения. Например, на Оке, где глубина реки на перекатах в маловодные годы достигает всего 70 см, при минимальном среднемесячном расходе 95% обеспеченности в 60 м<sup>3</sup>/сек основным лимитирующим условием ограничения водоотбора становится условие обеспечения судоходства. С этим пришлось столкнуться при оценке запасов подземных вод на Окском месторождении подземных вод, разведанном для водообеспечения Москвы и ряда городов юга области. В итоге, из разведанных 15 м<sup>3</sup>/сек эксплуатационных запасов подземных вод с учетом данного фактора было утверждено лишь 5 м<sup>3</sup>/сек.

В густонаселенных районах с высоким уровнем водопотребления и с большим числом водозаборов, расположенных вдоль реки, допустимость отбора и ущерба стоку от каждого из них не могут оцениваться без составления водохозяйственного баланса всего водосбора, а в ряде случаев и более широкого регионального водохозяйственного баланса, учитывающего интересы и взаимовлияние всех водопотребителей в регионе. Такой региональный водохозяйственный баланс особенно необходим при интенсивном использовании напорных вод и наличия региональной воронки депрессии, в которой могут оказаться многие водосборы сразу, как, например в Московском регионе, Курской Магнитной аномалии и др. Экологический аспект допустимости отъемов стока может оцениваться здесь лишь с учетом такого баланса.

Существенным резервом в таком балансе могут служить возвратные воды, сбрасываемые в реки после использования подземных вод на водосборе. Поэтому возвратные воды, если они сбрасываются назад в ту же реку и тем более если они после соответствующей очистки удовлетворяют качеству питьевых вод, могут быть вновь учтены в водном балансе реки, что и имеет место в практике.

Вместе с тем, следует подчеркнуть, что наличие возвратных вод далеко не всегда может служить аргументом для увеличения допустимого процента водоотбора и занижения реального ущерба стоку. Сброс возвратных вод, даже в тех случаях, когда он осуществляется в ту же реку, никогда не осуществляется в местах водозабора или выше него по течению, а осушать реку недопустимо даже на коротких (несколько километров) расстояниях между участками водоотбора и сброса воды.

Ограничением водоотбора в долинах рек, как уже отмечалось, могут служить не только минимальные расходы рек, но и снижение максимальных паводковых периодов и их объемов, а в ряде случаев и нарушения

всего внутригодового хода стока. Подобные случаи могут возникнуть и требуется учитывать, прежде всего, на реках, имеющих уникальное рыбохозяйственное значение. В качестве примера можно привести отказ в утверждении эксплуатационных запасов подземных вод в бассейне р. Урала в размере 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут для Тенгизского газоконденсатного месторождения, т.к. при таком отборе паводки будут снижены настолько, что прекратится периодическое затопливание расположенных на пойме старичных озер, где нерестится ценная Каспийская рыба. Принимая во внимание неразработанность экологических прогнозов и недостаточную изученность приспособляемости и толерантности различных видов экосистем к изменениям водного режима в наиболее общем случае с экологических позиций при определении допустимых объемов стока необходимо придерживаться по возможности основного принципа – не создавать условий, резко отличающихся от наблюдавшихся наихудших бытовых. В качестве таковых предельных, как было показано выше, могут служить минимальные среднемесячные значения 95% обеспеченности каждого месяца в отдельности [66, 67], снижение которых более, чем на 20–25% можно считать недопустимым.

Суммируя вышесказанное, можно утверждать, что управление водоотбором в условиях комбинированного использования поверхностных и подземных вод позволяет обеспечить недопущение снижения минимальных бытовых расходов рек ниже установленных допустимых и сохранить тем самым сформировавшееся на сегодня экологическое состояние водосбора.

Другим немаловажным фактором в определении допустимых отъемов стока, помимо воднобалансового, является качество подаваемых потребителю поверхностных вод. Это потребительское свойство воды оценивается чаще всего с двух позиций – соответствия ГОСТам на питьевые воды и на рыборазведение. Неизбежные, к сожалению, как бесхозяйственные, так и аварийные сбросы промстоков, а также различных бытовых, сельскохозяйственных и радиоактивных стоков делают поверхностные воды, особенно в маловодные периоды, часто непригодными и даже небезопасными для использования. Известны и нередки случаи, когда отдельные участки рек (например на Оке) признавались зонами экологического бедствия.

Оценка санитарного состояния реки не зависит от ее размера или расхода стока, так как удовлетворительным по качеству в необходимом районе может быть сток и ниже 95% обеспеченности и, в тоже время, неудовлетворительным по санитарным условиям может оказаться и большая река в паводок. Поэтому оценки допустимых отъемов стока по



санитарным показателям должны быть независимыми и не связанными с вышеприведенными экологическими оценками. В тоже время взаимосвязка этих оценок необходима в части, например, удовлетворения качества речных вод для рыбопроизводства.

Необходимые так называемые санитарные стоки, которые должны оставаться в реке ниже участка водоотбора, оцениваются по возможностям остаточного после проектного отбора стока разбавлять поступающие в поверхностные воды загрязнения до безопасного уровня, определяемого предельно допустимыми концентрациями (ПДК) по каждому из компонентов этих ГОСТов и по их сумме. В последнем случае оценка допустимого уровня загрязнения осуществляется, как известно, по формуле:

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{C_i}{ПДК_i} < 1, \quad (5.1)$$

где  $C_1; C_2 \dots C_i$  и  $ПДК_1; ПДК_2 \dots ПДК_i$  – концентрации ингредиентов ГОСТа и их ПДК.

В этой связи требуемый санитарный сток в зависимости от техногенной обстановки в регионе может оказаться значительно выше допустимого по сравнению с водно-балансовыми оценками.

К сожалению расчеты требуемых санитарных стоков далеко не всегда осуществляются, а в ряде районов эти требования даже далеко не всегда могут быть соблюдены. Так, например, несмотря на то, что около 30% подаваемой чистой воды в Москву из Верхневолжского и Московского источников водоснабжения сбрасывается в р. Москву специально для поддержания качества ее воды ниже города, она тем не менее содержит концентрации ряда компонентов, превышающие ПДК в несколько раз. В том числе по данным Ю.С. Осипова и др. (Прикладная экология, 1997) в 1993–1995 гг. в воде р. Москвы ниже города содержание нитратного азота достигало 3–11 ПДК, аммонийного азота 1–6 ПДК, железа 5–11 ПДК, меди – 4–11 ПДК, фенолов – 3–8 ПДК, нефтепродуктов – 4–7 ПДК.

Таким образом, даже такого значительного количества сбрасываемой чистой воды (свыше 30 м<sup>3</sup>/сек) оказывается недостаточным для поддержания качества воды в р. Москве на требуемом уровне.

Тем не менее, оценки санитарного состояния водоисточника необходимы как для обоснования требуемых водоохраных мероприятий, так и для обоснования требуемой водоподготовки перед ее подачей потребителю.

Совместное использование поверхностных и подземных вод как управляемая система позволяет, если не в полной мере решить вопросы обеспечения сохранения минимально допустимых и требуемых санитарных расходов стока и его качества, то по меньшей мере значительно повысить шансы добиться этого по сравнению с раздельным использованием этих вод.

В том числе, к примеру, длительная эксплуатация напорных вод неизбежно снижает пьезометрические уровни ниже уровней рек и грунтовых вод, создавая тем самым гидравлические предпосылки для нисходящей фильтрации последних. В результате, нисходящая фильтрация часто сильно загрязненных грунтовых и речных вод приводит к загрязнениям напорных горизонтов, служащих основным источником питьевого водоснабжения городов, даже, казалось бы, при хорошей их защищенности сверху слабопроницаемыми разделяющими слоями. Примером тому также может служить серия городов Подмоскovie, где истощение запасов подземных вод не только первого, но и второго от поверхности напорных водоносных горизонтов сопровождается и их загрязнением.

Периодический водоотбор с относительно кратковременным снижением и соответствующим быстрым восстановлением напоров в районах компенсационных водозаборов исключит не только истощение, но и загрязнения напорных водоносных горизонтов, т.к. такой водоотбор исключает саму исходную предпосылку для постоянно нисходящего движения поверхностных и подземных вод и сопровождаемых их загрязнений.

Одной из серьезных проблем обеспечения необходимого качества хозяйственно-питьевых вод является довольно частая природная некондиционность подземных вод для питьевых целей. В силу сложившихся естественных условий формирования подземных вод и в том числе природных геохимических аномалий подземные воды в значительной части регионов России содержат повышенные, по сравнению с ГОСТом на питьевые воды содержания железа, марганца, стронция, нитратов, фтора, жесткости, и других компонентов и показателей качества воды. Все это требует значительных расходов на водоподготовку, а в ряде случаев делает ее практически не реальной, так как экономичных методов такой подготовки в промышленных масштабах по ряду показателей вообще не существует.

Поверхностные воды несмотря на их более высокую подверженность техногенным загрязнениям, тем не менее, как правило, менее минерализованы, чем подземные воды вообще и по указанным компонентам, в частности. В этой связи смешение поверхностных и подземных вод

позволяет решить эту проблему и добиться в смеси кондиционности питьевых вод.

Наличие компенсационных водозаборов в общей структуре водоснабжения позволяет обеспечить безопасность потребителей от случайных катастрофических загрязнений поверхностного стока. Примеров таких залповых аварийных сбросов промстоков, прорывов отстойников загрязненных и некондиционных вод промышленных и горнорудных предприятий, животноводческих стоков, радиоактивных вод АЭС и т.п. не мало. Можно отметить известные подобные загрязнения Днестра, Припяти, Северского Донца, Москвы, Оки, Уфы и др., когда под угрозой находились водозаборы многих городов. Такие аварийные ситуации могут возникнуть в любое время года. Однако чаще всего они создаются в паводок, когда пруды-отстойники переполняются, а также потому, что некоторые промышленные предприятия используют паводок для сброса в реки части находящихся в переполненных отстойниках промстоков, рассчитывая на их незаметное разбавление в реке.

Включение компенсационного водозабора, слабо взаимосвязанного с рекой, и отключение основного инфильтрационного водозабора на период прохождения по реке загрязненных или некондиционных вод позволит сохранить необходимое качество питьевых вод. Каких-либо неблагоприятных экологических последствий при этом ожидать не приходится, особенно если такое экстренное и кратковременное включение компенсационного водозабора произойдет в многоводный период года.

В практике гидрогеологических исследований ущербы речному стоку принимаются во внимание главным образом при оценках эксплуатационных запасов подземных вод для водозаборов инфильтрационного типа. При этом весь водоотбор рассматривается как ущерб стоку и допустимость такого оценивается, как уже отмечалось выше, по сокращению минимального среднемесячного или 30-дневного стока 95% обеспеченности. Вместе с тем, при оценках запасов напорных водоносных горизонтов расчеты ущербов речному стоку далеко не всегда оценивались, особенно в прошлом, считая, что ущербы либо вообще не проявятся, либо проявятся не скоро, возможно, за пределами расчетного стока, либо слишком незначительны и могут не приниматься во внимание.

Расчеты ущербов речному стоку при оценках эксплуатационных запасов напорных вод начались лишь в последние годы при более широком введении в практику гидрогеологических исследований математического моделирования фильтрации в многослойных системах. В результате было установлено, что такой ущерб стоку неизбежно проявляется.

В итоге эта проблема в особо маловодные периоды, может оказаться для многих малых рек существенной, прежде всего в районах водозаборов, введенных в строй в прошлые годы.

В частности, ущерб речному стоку при оценках эксплуатационных запасов напорных вод уже четко проявился по многим малым водосборам Подмосковья.

Оценить количественно этот ущерб при общей региональной тенденции к росту меженного речного и соответственно подземного стока довольно трудно. Это можно выявить лишь на основе сопоставления многолетних данных по отклонениям двойных интегральных кривых стока от прямой (рис.5.2), да и то при условии, что в реку не осуществляется значительного сброса возвратных вод.

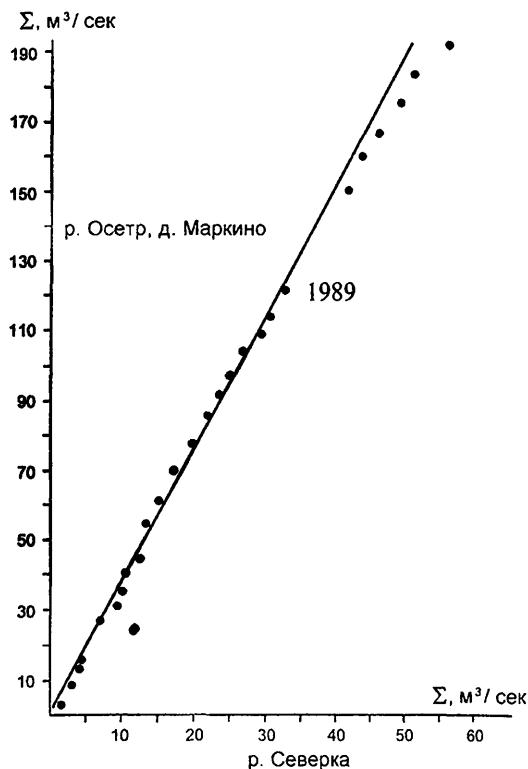


Рис. 5.2. Взаимосвязь интегральных сумм меженного стока рек Северка и Осетр

Как видно из рисунка, подземный сток в бассейне р. Северка в девятилетних годах начал сокращаться под влиянием регионального водоотбора и сформировавшейся воронки депрессии.

Периодический же водоотбор подземных вод, как было показано в главе 4, практически исключает недопустимый ущерб поверхностному стоку как в сезонном, так и в многолетнем разрезе. Более того, размеры водоотбора, даже превышающие в 3–5 раз восполняемые потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод, тем не менее все еще несопоставимо малы по сравнению со среднемноголетним стоком рек. В результате такой водоотбор при совместном использовании поверхностных и подземных вод лишь несколько снижает расходы поверхностного стока в его многоводные периоды и практически не затрагивает сток в маловодные периоды. Поэтому гидрологический режим по существу остается неизменным, что существенно важно для водных и взаимосвязанных с подземными водами наземных экосистем и не снижает эффективности экологической роли поверхностного стока, заключающейся в разбавлении и самоочищении попадающих в него загрязнений на протяжении всего гидрологического цикла.

Кратковременный периодический водоотбор из подземных вод и, прежде всего, из наиболее перспективных для этих целей напорных водоносных горизонтов, в силу инерционности их системы и замедленности проявлений ее реакции на грунтовые воды, практически исключит также многие другие негативные последствия в окружающей среде, в том числе осушение колодцев, служащих основным источником водоснабжения сельского населения, осушение болот, особенно верховых, служащих регулятором стока и имеющих экологическое значение, исключит одновременно развевание и самовозгорание торфов на переосушенных болотах, что также стало частым и опасным явлением во многих регионах страны, включая столичный.

Как уже отмечалось ранее, частым последствием продолжительной интенсивной эксплуатации подземных вод являются просадки земной поверхности. Они связаны с осушением и уплотнением перекрывающих водоносный горизонт рыхлых слабо консолидированных отложений [29, 36]. Как известно, процесс оседания земной поверхности протекает медленно, измеряется миллиметрами, реже сантиметрами в год и достигает существенных (до 1,5–2 м и более) размеров лишь при многолетней эксплуатации подземных вод со значительными водопонижениями. Просадки и связанные с ними деформации земной поверхности (трещины, воронки проседания и др.) становятся необратимыми также только при длительной эксплуатации подземных вод, т.к. процесс осушения и уплот-

нения слабо проницаемых перекрывающих отложений также весьма длителен. Как показывает опыт, существенные просадки земной поверхности начинаются чаще всего через несколько лет после снижения уровня подземных вод и создания тем самым потенциальной возможности для осушения и уплотнения перекрывающих водоносный горизонт отложений.

Зависимость процесса осадки земной поверхности от времени можно определить по уравнению [ 45 ]:

$$S_i = \frac{a}{1 + \varepsilon_{cp}} \int_0^m \Delta \delta_3(z, t) dz, \quad (5.2)$$

где  $S_i$  – величина осадки в см в момент  $t$ ;  $\Delta \delta_3(Z, t)$  – дополнительное эффективное напряжение (кг/см<sup>3</sup>);  $a$  – коэффициент сжимаемости пород, см<sup>2</sup>/кг;  $\varepsilon_{cp}$  – среднее значение коэффициента пористости;  $m$  – мощность сжимаемого слоя.

Вместе с тем, опыт периодической эксплуатации подземных вод показывает, что при сравнительно кратковременном осушении горных пород упругие их деформации не успевают перейти в пластические, приводящие к нарушению структуры пород и соответственно к необратимому их уплотнению. В результате после периодического, даже мощного сезонного водоотбора, начавшиеся упругие деформации земной поверхности полностью восстанавливаются и не приводят к катастрофическим последствиям. Таким образом, в отличие от длительной эксплуатации подземных вод при кратковременном водоотборе подземных вод, ориентированном только на погашение дефицитов стока, оседания земной поверхности либо вообще не произойдут, т.к. перекрывающие горизонт породы не успевают даже начать осушаться, либо произойдут в незначительных размерах без нарушения структуры пород с последующим восстановлением произошедших изменений. Примером тому может служить опыт периодической эксплуатации подземных вод в Шанхае (рис.5.3). Другими словами и по этому процессу комбинированное использование поверхностных и подземных вод имеет преимущество перед отдельной их эксплуатацией, т.е. предпочтительнее с экологической точки зрения.

Аналогичный вывод можно сделать и по карстово-суффозионным процессам. Последние активизируются главным образом за счет постоянного во времени подсоса агрессивных речных вод в водоносные горизонты, подверженные карстообразованию, т.е. сложенные карбонатными отложениями. Интенсивность этих процессов соответственно пропор-

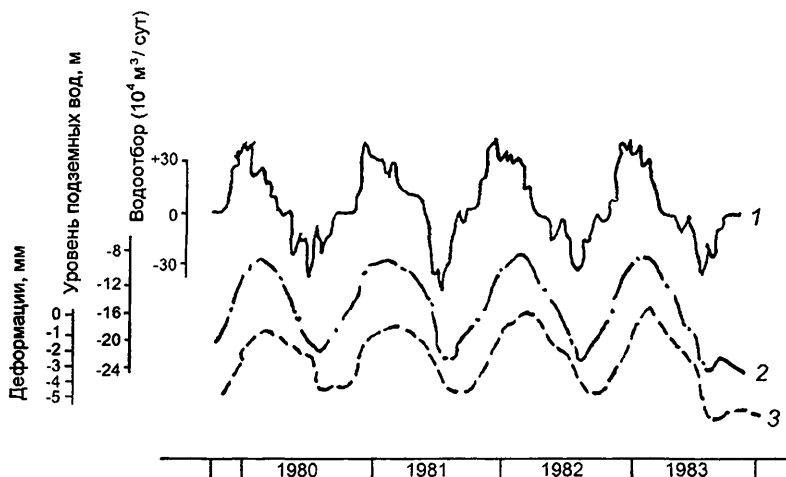


Рис. 5.3. Изменения уровней подземных вод (2) и деформаций земной поверхности (3) под влиянием водоотбора (1) в районе г. Шанхай

циональна ущербу речному стоку, обеспечивающему поступление в водоносный горизонт речных вод, насыщенных свободной углекислотой, приводящей к растворению карбонатов с последующим образованием карстовых провалов и воронок. Формирование последних ускоряется и усиливается суффозионными процессами, т.е. механическим выносом продуктов выщелачивания пород при водоотборе.

В одном из главных принципов комбинированного использования заложено условие практической недопустимости ущербов стоку при периодическом отборе подземных вод. Поэтому при таком использовании водных ресурсов поступление агрессивных вод в водоносный горизонт либо вообще исключено (в большинстве случаев), либо сведено к минимуму. В этой связи активизации карстовых и суффозионных процессов в зоне влияния компенсационного водозабора опасаться не приходится. Однако это не исключает, что в зоне влияния основного инфильтрационного водозабора, работающего только в многоводные периоды, карстовые процессы не будут активизироваться, как в районах обычных инфильтрационных водозаборов, работающих вне системы комбинированного использования. Но и в этом случае при комбинированном водоотборе можно ожидать меньшего выщелачивания пород, т.к. продолжи-

тельность работы основного водозабора будет меньше, чем при обычных инфильтрационных водозаборах, работающих в непрерывном режиме.

Длительная эксплуатация подземных вод как грунтовых, так и напорных вод, взаимосвязанных с грунтовыми, как известно, приводит не редко к угнетению наземных экосистем, снижению их продуктивности. Это связано со снижением уровней грунтовых вод и устойчивым переосушением не глубоко залегающей корневой системы. Периодический водоотбор подземных вод исключает устойчивое переосушение зоны аэрации и корневой системы. Более того, подавляющее количество наиболее продолжительных маловодных периодов приходится на зимнее время (декабрь–март), т.е. не в вегетационный период. Снижение уровней грунтовых вод в это время вообще не может причинить какой-либо ущерб растительности. К началу же вегетационного периода произойдет полное восстановление уровней грунтовых вод вследствие их основного весеннего питания. Отдельные летние маловодные периоды, как правило, менее продолжительны (один – реже два месяца), и поэтому эксплуатация подземных вод в это время далеко не всегда в состоянии истощить периодически пополняемые дождями запасы почвенных вод и нанести серьезный ущерб уже развившейся растительности. Таким образом и в собственно экологических аспектах комбинированное использование поверхностных и подземных вод имеет несомненное преимущество перед непрерывной эксплуатацией последних.

Одним из слабо изученных последствий водоотбора является активизация сейсмической деятельности. Как известно, последнее явление, получившее название «наведенные землетрясения», чаще всего проявляется при увеличении техногенных нагрузок на земную поверхность, например, созданием водохранилищ, закачкой промстоков в глубокие водоносные горизонты, орошением значительных площадей и т.п. Однако некоторые разрушительные землетрясения, такие как Ташкентское в 1965 г., Мексиканское в 1985 г. и другие связывают наоборот с интенсивным водоотбором подземных вод о чем свидетельствуют совпадения эпицентров землетрясений с центрами воронок депрессий. Появление землетрясений даже в платформенных не сейсмоактивных зонах, таких как Татария и Западная Сибирь, также не редко объясняют интенсивной эксплуатацией нефти и газа и сопровождаемыми их устойчивыми во времени региональными снижениями напоров подземных вод с соответствующим снятием части горного давления.

Периодическая эксплуатация подземных вод, наоборот, не создает ни региональных и устойчивых во времени воронок депрессии, ни про-



должительных и значительных снижений пластового давления и поэтому не может создать даже близкого по масштабам эффекта воздействия на водную систему, возникающего при длительной эксплуатации. Как следствие этого может стать и крайне низкая даже теоретическая вероятность активизации сейсмической деятельности при подобном использовании подземных вод.

Иногда можно услышать довольно дискуссионное мнение, что смешение различных по химическому составу поверхностных и подземных вод или частая смена подобных смесей сокращает срок службы трубопроводов, за счет их коррозии, что как бы ставит под вопрос экономическую целесообразность совместного использования поверхностных и подземных вод. Несостоятельность таких утверждений можно объяснить известным фактом о значительно более низких агрессивных свойствах пресных подземных вод по сравнению с речными. В результате смешение менее агрессивных подземных вод с более агрессивными речными может только улучшить агрессивные свойства смеси по сравнению с речными водами. Более того, в рекомендуемом оптимальном варианте совместного использования поверхностных и подземных вод, когда первые забираются основным инфильтрационным водозабором, а вторые – компенсационным и, тем более, особенно, когда оба водозабора заложены на один и тот же или смежные напорные водоносные горизонты, то в магистральный водопровод будут поступать практически одинаковые по составу подземные воды. Кроме того, следует отметить, что смешение даже таких вод из разных частей водоносного горизонта будет осуществляться в худшем случае два раза в год в течение 2–3-х месяцев в маловодные годы. Поэтому ожидать каких-либо ущербов трубопроводам в таких условиях не приходится.

Суммируя все вышеизложенное, можно заключить, что комбинированное использование поверхностных и подземных вод с периодической эксплуатацией подземных вод полностью не сможет исключить отдельные негативные последствия в окружающей среде, особенно при водоотборе из грунтовых вод. Однако и в этом случае негативный эффект этих последствий, как было показано выше, будет намного ниже, чем при постоянном водоотборе подземных вод. При использовании же напорных вод для погашения дефицитов поверхностного стока негативные последствия в окружающей среде вообще сводятся к минимуму и во многих случаях практически могут быть незафиксированными. Все это позволяет рассматривать данный способ использования водных ресурсов не только более рациональным с водно-балансовой или ресурсной точки зрения, но и более «чистым» с экологической точки зрения.

Оценка выгоды или невыгоды осуществления создания систем совместного использования поверхностных и подземных вод может быть осуществлена на основе их сопоставления с возможными другими альтернативными решениями проблемы водоснабжения в данном регионе. В том числе при ограниченных местных потенциальных эксплуатационных ресурсах поверхностных и подземных вод, т.е. тех водных ресурсах, которые могут быть забраны теми или иными водозаборными сооружениями в пределах допустимых ущербов стоку, т.е. с сохранением необходимого экологического стока или требуемого минимального санитарного стока рек, обеспечивающего водохозяйственный баланс водосбора, альтернативой совместному использованию может быть:

а) создание водохранилищ с сезонным или многолетним регулируемым объемом, обеспечивающим покрытие максимально возможных дефицитов стока в маловодные периоды;

б) создание водозаборов на подземные воды в водообеспеченных районах за пределами водосборов, примыкающих к водопотребителю. Нередко это связывается с созданием крупных групповых централизованных водозаборов, рассчитанных на водообеспечение серии потребителей по трассе к основному из них;

в) искусственное восполнение запасов подземных вод;

г) создание водозаборов на напорные водоносные горизонты с расчетом запасов подземных вод на определенный срок и с неизбежным истощением запасов к концу этого срока.

Создание водохранилищ, как уже отмечалось выше, неизбежно сопряжено с экономическими ущербами, связанными с отчуждением значительного количества плодородных и ценных в хозяйственном отношении земель – вызванными затоплением как минимум всех пойм, а в ряде случаев и низких надпойменных террас. Кроме того, также неизбежный подпор грунтовых вод и связанное с ним подтопление земель и населенных пунктов приводят к ухудшению экологического состояния значительных прилегающих к водохранилищам территорий, к трансформации наземных экосистем, почв и требуют либо дорогостоящей инженерной защиты либо затрат на перенос населенных пунктов и уникальных памятников культуры на новые места.

Значительный ущерб наносится рыбному хозяйству, т.к. плотины прерывают естественный ход рыбы на нерест, а рыбоподъемники и другие рыбопроводные инженерные сооружения не дают нужного результата. Кроме того водохранилища приводят к ухудшению качества поверхностных вод, накоплению загрязнений в донных осадках, всплыванию торфов на затопленных землях, эвтрофированию водоемов, развитию

фитопланктона и, в целом, к ухудшению экологии водных экосистем, снижению питьевых качеств воды.

Водохранилища активизируют также оползневые и карстовые процессы в прибрежных зонах, вызывают переработку берегов и другие склоновые процессы, что также сопряжено не только с ущербами окружающей среде, но и населенным пунктам, расположенным, как правило, по берегам рек.

Таким образом экономические и экологические ущербы от водохранилищ не могут быть даже близко сопоставимы с затратами на создание компенсационных водозаборов. Речь в данном случае идет только о компенсационных водозаборах, которые должны создаваться дополнительно к обычным водозаборам инфильтрационного типа.

Достаточно очевидны экономические преимущества систем совместного использования поверхностных и подземных вод и по сравнению с крупными централизованными водозаборами, расположенными на значительных расстояниях от потребителя. Техничко-экономические оценки альтернативных решений по выбору участков водозаборов неоднократно показывали, что основные расходы на сооружение водозаборов приходятся именно на водоводы и связанную с ними прокладку дорог, которые намного превосходят как капитальные затраты на строительство собственно водозаборов (бурение и оборудование скважин, монтаж насосных станций, строительство отводящих и сборных водоводов, отстойников и др.), так и эксплуатационные затраты (расходы на электроэнергию, зарплату, текущий ремонт, амортизационные отчисления, а также непредвиденные расходы). В результате создание крупных централизованных водозаборов сопряжено с огромными единовременными материальными затратами, которые в любых условиях и, тем более, в условиях далеких от экономического благополучия страны в целом выделить крайне трудно. Все это неизбежно приводит к затяжке ввода в строй таких водозаборов, делает их сооружение практически нереальным, часто просто утопическим.

Совместное использование поверхностных и подземных вод позволяет решать проблему водоснабжения поэтапно для каждого города в отдельности или для ряда соседних малых городов без существенных разовых капитальных затрат. Объемы возможного водоотбора даже в долинах малых рек, развитых повсеместно, как было показано выше, позволяют получить намного больше воды, чем водозаборами с непрерывной эксплуатацией подземных вод, и при этом удовлетворить потребность в воде не только малых, но и средних городов (с населением до 200–300 тыс. человек). Кроме того крупный водоотбор, сосредоточенный в

одном регионе, неизбежно приведет к отмеченным выше негативным последствиям в окружающей среде, (просадки, карст, ущербы стоку, экологии и др.), что практически исключается при рассредоточенном совместном использовании водных ресурсов в целом с преимущественным использованием подземных вод на погашение дефицитов поверхностного стока.

Создание крупных магистральных централизованных водозаборов, удаленных от потребителя, может быть оправдано лишь при сильной загрязненности ближайших к потребителю малых рек, непригодных для питьевого водоснабжения при современном уровне водоочистки, и при высокой концентрации малых городов. Так, например, возможно целесообразным может служить создание такого централизованного водозабора на базе Приокского месторождения подземных вод, разведанного для водоснабжения ряда городов южной половины Московской области и ряде южных районов самой Москвы. На воду этого месторождения претендуют 19 малых городов Южного Подмосковья, эксплуатирующие напорные водоносные горизонты при помощи собственных небольших водозаборов производительностью от 8 до 74 тыс. м<sup>3</sup>/сут в среднем 37,4 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Большая часть этих водозаборов уже исчерпала свои эксплуатационные запасы. В условиях сформировавшихся региональной и локальных воронок депрессии изыскать новые водозаборы вблизи таких городов будет сложно. В отдельных случаях можно заложить эксплуатационные скважины на более глубокие ранее не эксплуатировавшиеся или лишь частично эксплуатировавшиеся водоносные горизонты. Однако они, как правило, имеют значительно худшие фильтрационные свойства, чем вышезалегающие, и поэтому их запасы либо будут быстро сработаны, т.е. произойдет истощение запасов подземных вод, либо начнется подсос загрязненных речных и грунтовых вод и неизбежно проявится ущерб речному стоку, т.к. восполнение запасов может осуществляться только за счет перетекания из вышезалегающих водоносных горизонтов и реки. Поэтому в данном случае целесообразным было бы подключение этих городов к централизованному региональному водопроводу, базирующемуся на Приокском месторождении подземных вод.

При этом собственные водозаборы таких городов должны быть остановлены, но не ликвидированы, а законсервированы на случай их периодического использования для погашения дефицитов поверхностного стока в Оке.

Как уже отмечалось выше, по соображениям сохранения условий для судоходства на Оке в маловодные годы из разведанных округленно 15 м<sup>3</sup>/сек эксплуатационных запасов подземных вод утверждено лишь

5 м<sup>3</sup>/сек. Однако в многоводные годы водоотбор может быть увеличен до 15 м<sup>3</sup>/с и более при условии его сокращения до 5 м<sup>3</sup>/сек в маловодные периоды. Возникающий при этом дефицит водопотребления в 10 м<sup>3</sup>/сек может быть покрыт форсированной в 2–3 месяца эксплуатацией отключенных водозаборов с восстановленными напорами в эксплуатационных скважинах. Таким образом при такой системе СИППВ разведанное Приокское месторождение может быть задействовано на полную мощность уже сейчас. Проблема заключается лишь в создании трубопровода по закольцованным водозаборам малых городов юга области.

Режим возможного функционирования таких водозаборов будет обоснован ниже, как один из перспективных вариантов совместного использования поверхностных и подземных вод. В этом случае обеспечение надежности водоподдачи потребителям строится по принципу единой закольцованной энергетической системы регионов. Вместе с тем, несмотря на принципиальную привлекательность подобного решения проблемы водоснабжения следует еще раз подчеркнуть его высокую стоимость. В большинстве же случаев решение этой задачи может быть осуществлено за счет систем совместного использования поверхностных и подземных вод. Даже в условиях сильно загрязненных рек, не пригодных для питьевого водоснабжения, их ресурсы могут быть использованы для организации технического водоснабжения, доля которого не редко довольно высока в общей потребности малых и средних городов.

Одним из возможных способов повышения эффективности и надежности функционирования систем совместного использования поверхностных и подземных вод (СИППВ) является искусственное подпитывание подземных вод (ИППВ). Перспективность ИППВ определяется расположением водозаборов СИППВ в долинах рек, где существуют наиболее благоприятные условия для искусственного и естественного восполнения запасов подземных вод.

Вопросы искусственного восполнения запасов подземных вод рассматривались достаточно детально во многих работах [5, 48, 49, 62 и др.]. Поэтому в данном случае целесообразно остановиться лишь на особенностях ИППВ при СИППВ.

Сооружения ИППВ, как известно, включают обычно водозаборные, водопоглощающие и водоподготавливающие конструкции и подразделяются на открытые и закрытые. Открытые сооружения представляют собой обычно водопоглощающие бассейны, каналы или дрены, создаваемые для подпитывания грунтовых вод в виде свободной инфильтрации. Предпосылкой для последней может служить хорошо проникаемая зона аэрации. Для улучшения поглощения воды из бассейнов их ложе высти-

ляется песком и гравием. При характерном трехслойном строении аллювия для сооружения водопоглощающего бассейна делается выемка слагающего верхнюю часть пойм или террас слабопроницаемого слоя пойменных фаций до хорошо проницаемых русловых фаций аллювия.

Для повышения эффективности СИППВ поглощающие бассейны могут располагаться как в районе основных, так и компенсационных водозаборов.

Бассейны или каналы для ИППВ в районе основных водозаборов следует создавать в тех случаях, когда пропускная способность ложа реки не в состоянии обеспечить требуемую производительность водозабора, а также для повышения производительности скважины и сокращения в итоге длины водозаборного ряда. Это дает сокращение площадей отчуждаемых земель, длины трубопроводов и количества эксплуатационных скважин.

Бассейны или обводной канал закладываются с противоположной стороны от водозабора по отношению к реке (рис.5.4а). В итоге водозабор располагается как бы на острове. При этом, если для расчетов эксплуатационных запасов подземных вод без ИППВ использовалась схема полуограниченного пласта с контуром постоянного напора на границе-реке ( $H = \text{const}$ ), то при наличии канала может использоваться расчетная схема пласта-полосы с  $H = \text{const}$  на обеих границах или  $H = \text{const}$  на реке и граница второго рода ( $H = \text{const} = 0$ ) на канале. Вода в обводной канал подается самотеком из реки круглогодично или только в многоводные периоды, что повышает гарантированность перехвата поверхностного стока. В качестве примера приведем расчет производительности единич-

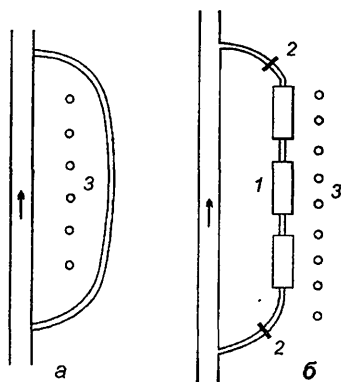


Рис. 5.4. Схемы искусственного восполнения запасов подземных вод в районах основного (а) и компенсационного (б) водозаборов

1 – компенсационные бассейны;  
2 – затворы; 3 – эксплуатационные скважины

ной эксплуатационной скважины в линейном ряду водозабора по Маскету-Лейбензону для схем полуограниченного пласта и пласта-полосы и при принятых ранее расчетных гидрогеологических параметрах ( $k = 10$  м/сут,  $S_{\text{доп}} = 10$  м;  $H = 15$  м;  $r_0 = 0,1$ ;  $l = 100$  м;  $\sigma = 100$  м и  $L$  – ширина междуречья 200 м). В первом случае производительность скважины составила 835 м<sup>3</sup>/сут, а во втором 1157 м<sup>3</sup>/сут, т.е. в 1,4 раза больше. Таким образом длина проектного водозаборного ряда и число эксплуатационных скважин при наличии ИППВ могут быть почти в 1,5 раза сокращены.

Это обстоятельство становится особенно важным, когда пропускная способность ложа реки не высока. Так, например, в долине р. Москвы при разведке Звенигородского месторождения запасов подземных вод была установлена пропускная способность ложа реки в 8–14 м<sup>3</sup>/сут на погонный метр, в среднем 10 м/сут. В результате для перехвата расчетной производительности водозаборов в приведенных в главе 4 примеров по долинам рек Москвы и Ламы потребовалось бы создать водозаборы длиной соответственно в 4,5 км и 12 км. При ИППВ такие водозаборы могут быть почти в 1,5 раза более компактными и экономичными.

В районах компенсационных водозаборов целесообразно сооружать не обводной канал, а серию инфильтрационных бассейнов. Обычно такие бассейны представляют собой выемки грунта длиной 100–400 м, шириной 15–30 м и глубиной до 2–4 м. Для их сооружения могут быть использованы выделяющиеся в рельефе старые русла рек, цепи старичных озер на поймах либо выявленные разведкой участки террас или пойм с высокими фильтрационными свойствами аллювиальных отложений. Создание серии инфильтрационных бассейнов вызвано тем, что подавать воду в каналы в маловодные периоды нельзя, т.к. в это время воды в реке и так не будет хватать для обеспечения среднегодовой проектной производительности водозабора. Поэтому бассейны должны служить для накопления запасов воды на случай именно нехватки воды в реке для покрытия дефицитов стока. В этой связи бассейны в районе компенсационных водозаборов должны заполняться только в многоводные периоды, а расходоваться в маловодные. Объемы этих бассейнов должны быть увязаны с возможными дефицитами стока или ущербами ему. В связи с тем, что несмотря на то, что периоды наступления маловодий внутри года сравнительно закономерны, а дефициты стока плохо предсказуемы и случайны, объемы запасаемой в бассейнах воды должны быть ориентированы на наиболее маловодные серии по объему дефицитов из рассчитанных вероятных. Кроме того, в отличие от самотечного канала в районе основного водозабора, фильтрационные бассейны в районе компенса-

ционного водозабора должны управляться, т.е. перекрываться затворами снизу и сверху в маловодные периоды (см. рис.5.4б) с тем, чтобы исключить отток из них накопленных запасов воды.

Основная емкость компенсационных бассейнов должна располагаться в водонасыщенной зоне грунтовых вод, то есть не выше уровня последних. Это исключит естественный отток накопленной воды из бассейна и сохранит ее до очередного маловодного периода.

Инфильтрационные бассейны служат по меньшей мере границей II рода, через которую в виде дождевания поступает дополнительное питание подземных вод. Одновременно река служит границей первого рода. Однако ее роль при этом снижается и ущерб стоку пропорционально сокращается. Это позволяет увеличивать нагрузки на каждую скважину водозабора. В результате инфильтрационные бассейны не только сокращают размеры ущерба поверхностному стоку, но и увеличивают производительность эксплуатационных скважин, что позволяет также сократить длину водозабора и число скважин в нем. Опыт зарубежных исследований (Custodio, 1977) показывает, что эффективность или коэффициент полезного действия таких систем достигает 0,7, т.е. около 70% искусственно инфильтруемых вод перехватывается водозабором. В результате ИППВ позволяет на две трети сократить число эксплуатационных скважин, что очень важно для компенсационных водозаборов, удаленность которых от реки часто определяет невысокую производительность скважин (см. табл.4.3) и в результате требует значительной протяженности водозаборов.

Вместе с тем, на водообеспечение компенсационных водозаборов только за счет ИППВ в полной мере вряд ли следует рассчитывать по экономическим соображениям. Так, например, для приведенного выше примера в бассейне р. Ламы при среднем дефиците стока в  $0,45 \text{ м}^3/\text{сек}$  ( $39 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$ ) в течение максимально возможного маловодного периода в 60 суток суммарный объем дефицита составит  $2,3 \text{ млн м}^3$ . Для накопления такого объема потребовалось бы создать около 64 инфильтрационных бассейнов длиной в 400 м, шириной 30 м и глубиной 3 м, что не реально. Более того, вряд ли стоило ориентироваться на покрытие общих дефицитов стока только за счет ИППВ. Для этой цели существуют достаточно большие объемы водоносного горизонта, которые и служат необходимой резервной регулирующей емкостью для покрытия таких дефицитов в целом.

Использование ИППВ в районах компенсационных водозаборов целесообразно в тех случаях, когда в зависимости от заявленной потребности в воде или возникающих значительных дефицитов стока приходится



ориентироваться только на те варианты, в которых ущербы стоку становятся выше допустимых. Так, в том же расчете по р. Ламе показано, что при увеличении суммарного водоотбора, в 5 раз превышающего потенциальные эксплуатационные запасы подземных вод, т.е. до  $1 \text{ м}^3/\text{сек}$ , ущерб стоку возрастет до 7% от минимального стока 95% обеспеченности, при принятых допустимых 5%.

Без учета возможного использования ИППВ этот вариант был отвергнут как недопустимый. Однако с учетом ИППВ он может быть реализован.

При этом, как видно из таблицы 4.5, средний водоотбор в  $0,4 \text{ м}^3/\text{сек}$  должен поддерживаться компенсационным водозабором в течение 90 суток. Для предотвращения же возможного сверхнормативного ущерба в 2% от минимального стока, равного  $1700 \text{ м}^3/\text{сут}$  в течение 90 суток потребовалось бы создать емкость в 153 тыс.  $\text{м}^3$  или всего 4 таких же инфильтрационных бассейна. Это мероприятие в итоге дало бы дополнительно  $200 \text{ л}/\text{сек}$  или  $17 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$ . Четыре таких бассейна вполне обеспечат полную компенсацию расчетного ущерба. Так, даже при достаточно «осторожной» скорости инфильтрации в  $0,5 \text{ м}/\text{сут}$  каждый из таких бассейнов площадью в  $1200 \text{ м}^2$  способен обеспечить поступление в водонесный горизонт  $600 \text{ м}^3/\text{сут}$ , что при коэффициенте использования 0,7 дает требуемый расход в  $1700 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Заполнение сработанных в маловодные периоды запасов воды в инфильтрационных бассейнах приведет к более быстрому восстановлению уровней в зоне влияния компенсационных водозаборов, что также повысит надежность их функционирования, особенно для случаев появления маловодных серий дважды в год (зимой и летом). Использование ИППВ в таких случаях не только рационально, но и экономически оправдано. При этом решения о целесообразности ИППВ в районах основных и компенсационных водозаборов должны приниматься независимо друг от друга, руководствуясь только технико-экономическими соображениями.

ИППВ в итоге позволяет увеличить производительность и обеспечить стабильность работы водозаборов, улучшить качество инфильтруемых поверхностных и отбираемых подземных вод, создать сезонные запасы подземных вод, предотвратить недопустимое понижение уровней грунтовых вод и связанное с ним угнетение наземных экосистем.

Применение ИППВ для повышения эффективности работы систем СИПВ в районах водозаборов, заложенных на напорные воды с перетеканием или без него менее эффективно. Связано это с тем, что восстановление или поддержание напоров должно осуществляться через закрытые сооружения, т.е. через поглощающие скважины, шахты или

колодцы. Для исключения быстрой кольматации приствольных частей скважин или колодцев необходимо также создавать бассейны-отстойники с противодиффузионными экранами, исключающими непродуцируемые утечки из них. Нисходящая самопроизвольная инфильтрация воды из таких бассейнов в водоносный горизонт по таким скважинам, колодцам только под влиянием разности напоров малопродуктивна, а искусственная закачка воды в горизонты, тем более в значительных объемах дорогостоящая. Кроме того, бассейны-отстойники также должны заполняться только в многоводные периоды и поэтому должны содержать довольно большие запасы воды, необходимые для покрытия дефицитов стока или компенсации сверхнормативных ущербов стоку в маловодные периоды. Более того, как было показано в главе 4, запасов воды в водоносном горизонте нередко может быть намного больше, чем этого требуется для погашения дефицитов стоку и главной проблемой здесь является не производительность компенсационного водозабора, а допустимость возникающих при его работе ущербов стоку. Поэтому целесообразность ИППВ в таких случаях должна определяться главным образом для компенсационных водозаборов и в связи с возможностью снижения ущербов стоку при помощи таких сооружений. Принимая во внимание упругий характер фильтрации в период работы компенсационного водозабора может быть рассмотрена гидравлическая роль поглощающих скважин как точечных границ водоносного горизонта («стоков») на стабилизацию напоров и снижение за счет этого ущербов стоку при решении вопроса об использовании вариантов максимально возможного водоотбора, при которых ущербы стоку могут превышать критические. Решение этой задачи должно осуществляться на моделях применительно к конкретным гидрогеологическим условиям и планируемому водоотбору.

Как уже отмечалось выше, в условиях, когда ни один из вариантов использования подземных вод, предусматривающих неограниченную во времени эксплуатацию подземных вод не может быть реализован, в качестве последнего альтернативного может рассматриваться вариант использования напорных вод с расчетом их запасов на лимитированный срок. При этом, как уже указывалось, неизбежным становится истощение запасов подземных вод к концу этого срока и серия негативных последствий в окружающей среде (ущерб стоку, активизация карстово-суффозионных процессов, проседания земной поверхности, снижение уровней грунтовых вод и связанных с этим угнетение экосистем, переосушение болот и др.). Высказываемые иногда мнения о том, что сработка эксплуатационных запасов подземных вод к расчетному сроку не должна рас-

смагиваться как истощение, является не более как терминологической тонкостью. Факт истощения при этом неизбежно наступает и связанные с этим негативные последствия в окружающей среде также. Необходимо все же отметить, что с рядом таких негативных последствий можно бороться и предотвращать их. Так, для покрытия возникающих дефицитов стока и сохранения требуемых условий функционирования наземных экосистем можно использовать часть откачиваемых водозаборами подземных вод. Такие мероприятия неоднократно рассматривались. Например, при разведке запасов подземных вод на Самур-Кусорчайском междуречье для водоснабжения Баку в целях сохранения ценного для этого района лесного массива предусматривалось использование до 10% откачиваемой воды для орошения леса и поддержания необходимого уровня грунтовых вод. Орошение требовалось также для поддержания увлажненности лесной подстилки в целях предотвращения размножения саранчи.

При разведке и оценке запасов Северной группы месторождения подземных вод Подмосковья моделированием было установлено 15 малых рек, ущерб стоку которым превысит при эксплуатации подземных вод допустимые 20%, а по ряду из них (Яхрома, Березовка, Крутец, Шибахта, Кубачка) свыше 45–50% от межennaleго среднемесячного стока 95% обеспеченности. Для покрытия этих ущербов рассмотрен вариант создания ряда компенсационных водозаборов с суммарным водоотбором 1,28 м<sup>3</sup>/сек, работающих в течение 3-х меженных месяцев и сбросом этой воды в реки. В результате суммарный водоотбор в эти месяцы возрастет на 12%, а дополнительный ущерб стоку не превысит 2–3% и составит не более 10% от производительности компенсационных водозаборов.

Подобное мероприятие может решить проблему водного баланса малых рек, попавших в кризисную ситуацию в связи с интенсивной эксплуатацией подземных вод, но не решает многие другие проблемы. Снижение расходов рек в таких случаях происходит прежде всего вследствие перехвата подземного стока и снижения уровней грунтовых вод на значительных пространствах, охватывающих нередко весь водосбор в целом. Снижение же уровней грунтовых вод искусственным пополнением речного стока не остановить. В итоге также неизбежным останется угнетение наземных экосистем, особенно в тех частях водосбора, где капиллярная кайма находилась в зоне развития корневой системы растительных сообществ. Неизбежным остается осушение колодцев, болот, повышение пожароопасности территорий за счет осушения торфяников на значительных площадях и создания условий их самовозгорания.

Увеличение суммарной производительности водозабора при компенсации ущербов малым рекам лишь усилит эти негативные процессы. Не ясным остается и вопрос, как повлияет на водные экосистемы сброс, более чем в 2 раза минерализованных подземных вод, часто содержащих к тому же значительное количество железа, марганца и высокую жесткость в реки, особенно когда подземные воды будут составлять до половины речной воды. Неизбежным также остается и истощение запасов подземных вод к расчетному сроку. Все эти вопросы безболезненно решаются при комбинированном или СИППВ.

При обосновании рациональных схем водозаборных сооружений важно рассмотреть прежде всего оптимальную конструкцию основного водозабора. При этом при создании основного круглогодичного водозабора главным вопросом становится обоснование возможности полного перехвата всех потенциальных эксплуатационных ресурсов поверхностных и подземных вод, обеспечиваемых рекой как в маловодный, так и особенно в многоводный период. Здесь могут быть рассмотрены варианты одно- или двухрядного скважинного водозабора, параллельной или поперечной галерей, шахтных колодцев, лучевого водозабора, обводные каналы для искусственного восполнения запасов подземных вод. Для получения максимально возможной производительности эксплуатационных скважин последние должны закладываться как можно ближе к реке и сооружению ИППВ, но на расстоянии, обеспечивающем очистку поверхностных вод от бактериального загрязнения, что оценивается экспериментально. В пористых средах эта задача обычно решается при расстояниях водозабора от реки в пределах 50–100 м.

Для повышения фильтрационных свойств ложа реки и пропускной его способности рекомендуется и, как уже отмечалось выше, используется периодическое рыление дна реки, что позволяет устранить кольматацию донных отложений, представленных тонкой фракцией аллювия и взвешенными наносами. Подобную процедуру целесообразно производить на малых реках в равнинных районах перед осенним паводком, который затем снесет осевший взвешенный материал. На горных и предгорных реках, где русловые процессы активны и ежегодно в паводок перестраивают ложе реки, проведение подобных мероприятий не целесообразно. Выбор оптимального варианта осуществляется в соответствии с Инструкцией по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство по сопоставлению приведенных затрат на тот или иной вариант водозабора, которые включают годовые эксплуатационные расходы, сумму капитальных затрат и нормативный коэффициент эффективности (величину обратную норматив-

ному сроку окупаемости). Примеры расчетов капитальных затрат и эксплуатационных расходов на создание водозаборов даны в работах [6, 80].

В число главных задач минимизации затрат, как уже указывалось, входит выбор числа эксплуатационных скважин, длины водозаборного ряда, а также капитальные затраты на трубопроводы, дороги, сооружения ИППВ и изъятие земель.

При рассмотрении рациональных схем компенсационных водозаборов в число главных технико-экономических оценок входит, как было показано выше, нахождение рационального расстояния водозабора от реки по оптимуму эффективного водоотбора (разности отбора и ущерба стоку), минимизация затрат на сооружение водозабора, проектной производительности на основе сопоставления капитальных затрат с учетом и без учета ИППВ, расстояний до потребителя и выбора эксплуатируемого горизонта. Как было отмечено выше, наиболее рациональным для покрытия дефицитов стока представляется использование напорных вод как с перетеканием, так и особенно без него (за период работы компенсационного водозабора).

Важным также является численная оценка экономической эффективности СИППВ по сравнению с другими альтернативными решениями проблемы водоснабжения и прежде всего по сравнению с традиционными водозаборами на подземные воды с учетом всех экологических последствий.

Резюмируя все вышеизложенное, можно сформулировать следующие экологические и экономические преимущества комбинированного использования поверхностных и подземных вод по сравнению с раздельной их эксплуатацией:

1. Возможность в 2–5 раз увеличить водоотбор по сравнению с потенциально возможными эксплуатационными ресурсами поверхностных и подземных вод;

2. Обеспечить надежное и неограниченное во времени водоснабжение населения и хозяйства без угрозы неизбежного истощения запасов подземных вод;

3. Снизить и во многих случаях полностью исключить многочисленные негативные последствия в окружающей среде, вызываемые непрерывной эксплуатацией подземных вод (часто недопустимые ущербы речному стоку, угнетение водных и наземных экосистем, просадки земной поверхности, карстово-суффозионные провалы и др.);

4. Обеспечить водой города поэтапно (по мере необходимости) за счет местных водных ресурсов без значительных единовременных капиталь-

ных затрат на создание удаленных от потребителя водозаборов (в том числе на трубопроводы, дороги, отчуждение земель и др.);

5. Повысить эффективность использования водных ресурсов без регулирования стока водохранилищами и связанных с их созданием многочисленных негативных экологических последствий;

6. Обеспечить повышение качества подаваемых потребителю питьевых вод как за счет самоочищения часто загрязненных поверхностных вод, перехватываемых инфильтрационными водозаборами, так и за счет улучшения в отдельных случаях качества подземных вод в результате их смешения с менее минерализованными поверхностными водами, что позволяет снизить концентрации отдельных гостимулируемых компонентов в подземных водах (железо, стронций, фтор, жесткость и др.), содержащихся не редко в подземных водах в повышенных по сравнению с ПДК значениях.

**ЧАСТЬ II**

**ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗНЫХ  
ОЦЕНОК НАДЕЖНОСТИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ  
СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ  
ВОД В РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВЫХ  
ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ  
УСЛОВИЯХ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА**

---

Московский регион является одним из наиболее благоприятных для создания систем совместного или комбинированного использования поверхностных и подземных вод. Это – один из наиболее урбанизированных районов страны с высокой плотностью населения, промышленности и даже интенсивной сельскохозяйственной освоенностью земель. Потребление воды в регионе, как правило, повсеместно и постоянно растет, за исключением нескольких последних лет в связи с экономическим кризисом, что наряду с ограниченностью водных ресурсов создает проблемы в изыскании новых источников водоснабжения населения и переоценке существующих запасов пресных подземных вод, в изыскании новых способов и методов оптимизации и обеспечении стабильности водопользования, в учете и рациональном использовании всех существующих водных резервов.

Интенсивная эксплуатация подземных вод в Москве, начавшаяся с 40–50-х годов, привела к снижению пьезометрических уровней всех трех основных водоносных горизонтов карбона. В результате верхнекаменноугольный горизонт на большей части города и в районах водозаборов ряда городов Подмосковья уже практически сдренирован. Напоры среднекаменноугольного (подольско-мячковского) горизонта снижены на 50–70 м и местами в центрах воронок депрессии уже началось его осушение. Напоры нижнекаменноугольного горизонта снижены в городе до 90–120 м. Региональная воронка депрессии от этого водоотбора достигает радиуса около 50–70 км. Понижения уровней напорных вод в пределах региональной Московской воронки осложнены многочисленными и существенными местными локальными воронками депрессии, обусловленными работой водозаборов малых городов области, водоснабжении которых обеспечивается почти исключительно подземными водами. Многие из таких водозаборов уже практически исчерпали свои эксплуатационные запасы, т.е. сработали напоры горизонтов и начали их осушение. Сроки, на которые оценивались эти запасы, также истекли или истекают. Среди водозаборов с истощенными запасами подземных вод, стоящих перед необходимостью либо их полного отключения, либо резкого со



крашения водоотбора, можно назвать водозаборы городов и поселков Щербинка, Бутово, Троицк, Электросталь, Электроугли, Купавна, Балашиха, Реутов, Люберцы, Дзержинск, Лыткарино, Томилино, Подольск, Одинцово, Домодедово, Видное, Щелково. Истощение запасов подземных вод не редко сопровождается их загрязнением, чему способствует снижение пьезометрических напоров ниже уровней загрязненных грунтовых вод и рек и подсосом их вод к водозаборам. В результате в таких городах необходимо в сумме отключить по разным оценкам около 4–5 м<sup>3</sup>/сек и заменить их новыми и чистыми источниками водоснабжения.

Другой и может быть главной водозооэкономической проблемой Московского региона является необходимость гарантированного обеспечения Москвы качественной питьевой водой. В настоящее время Москва почти полностью водоснабжается за счет поверхностных вод. При этом большая часть воды (до 80%) подается из Ивановковского водохранилища, а остальная часть из Москворецкой системы, включающей серию малых водохранилищ (Истринское, Озернинское, Рузское, Можайское и Вазузское).

Водоподача в водопроводы города осуществляется из 4-х основных станций, в том числе по данным на 1995 г. из Рублевской – 21,9 м<sup>3</sup>/сек, Восточной – 16 м<sup>3</sup>/сек, Северной – 22,3 м<sup>3</sup>/сек и Западной – 19,7 м<sup>3</sup>/сек, в сумме около 80 м<sup>3</sup>/сек. Помимо этого на обводнение и поддержание должного санитарного состояния р. Москвы из Волжского источника подается 30–31 м<sup>3</sup>/сек, а из Москворецкого – 4–5 м<sup>3</sup>/сек. Из подземных вод в Москве в целях водоснабжения в последние годы отбиралось 1,8–2,9 м<sup>3</sup>/сек, что в сумме с дренажным водоотливом из метро (1,8 м<sup>3</sup>/сек) составляет 4,7 м<sup>3</sup>/сек при утвержденных запасах подземных вод в 5,06 м<sup>3</sup>/сек.

Таким образом суммарное водопотребление Москвы составляет около 120 м<sup>3</sup>/сек. Качество поверхностных вод, особенно Москворецкой системы, обладающей малой инерционностью, периодически нарушается аварийными сбросами промышленных и животноводческих стоков. Не гарантировано оно и от возможных заражений при различных экологических катастрофах, типа Чернобыльской. Все это обязывает изыскать для Москвы гарантированный на такой «особый период» чистый источник хозяйственно-бытового, питьевого водоснабжения исходя из принятых норм в 100–120 л/сут на человека.

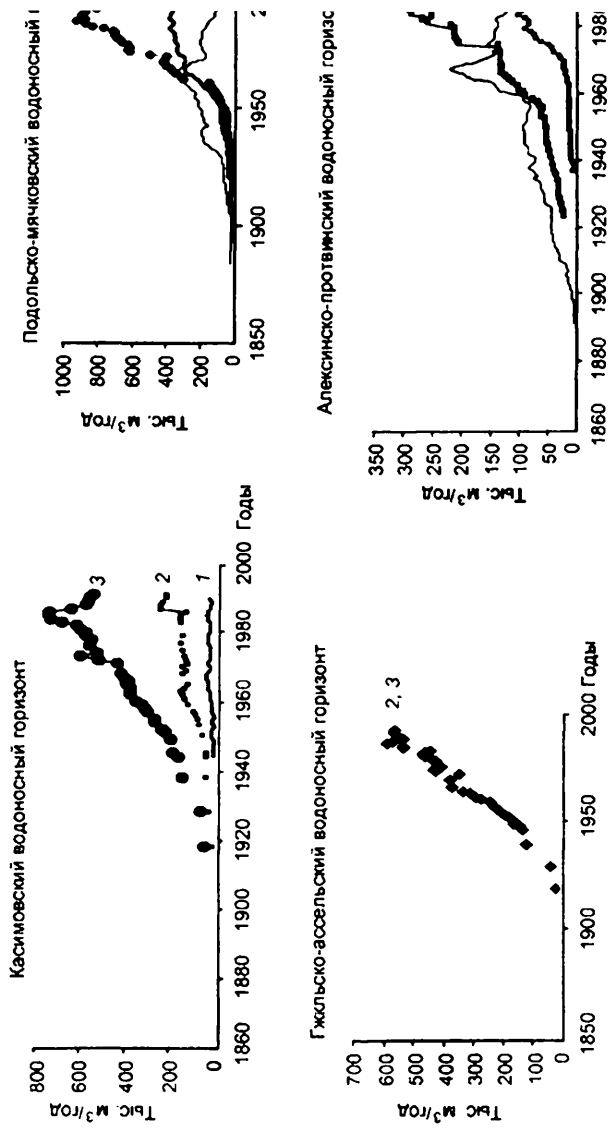
В настоящее время население Москвы составляет около 8 миллионов человек. Однако оно неуклонно растет и к 2010 г. предполагается его увеличение до 8,3 миллионов. Даже при снижении удельного водопотребления по планам до 235 л/сут на душу населения потребность города в

хозяйственно-питьевой воде к этому сроку должна составить на особый период 9,6–11,6 м<sup>3</sup>/сек (при указанной норме на человека в сутки).

Суммарное водопотребление в городе, как уже отмечалось выше, в связи с экономическим кризисом в последние годы несколько сократилось, по разным оценкам на 13–20%. Однако, при этом водопотребление на коммунальные нужды продолжало расти. С преодолением же кризиса в итоге следует ожидать неизбежного увеличения общего водопотребления и в городе, и в ЛПЗП, и в области. Динамику этого водопотребления в многолетнем разрезе по основным водоносным горизонтам Московского артезианского бассейна можно проиллюстрировать рисунком II.1. Резкого изменения таких тенденций роста водопотребления, по-видимому, ожидать трудно и это следует учитывать.

Удовлетворение потребности в качественной питьевой подземной воде города и области вполне возможно за счет введения в строй уже разведанных и предварительно оцененных эксплуатационных запасов подземных вод по периферии области за пределами региональной воронки депрессии. К таковым относятся 4 системы или группы водозаборов: Южная (Окские водозаборы) – 15 м<sup>3</sup>/сек, Северная (Дубненские водозаборы – 9 м<sup>3</sup>/сек, Западная (Звенигородский водозабор) – 1,6 м<sup>3</sup>/сек и Восточная (водозаборы в бассейне р. Клязьма) – 5 м<sup>3</sup>/сек до 10 м<sup>3</sup>/сек при полном освоении участков. Из этих водозаборов можно подать в Москву 19 м<sup>3</sup>/сек, а 12 м<sup>3</sup>/сек использовать «по дороге» для водоснабжения малых городов области, что более чем достаточно.

Полностью покрыть потребность Москвы и подмосковных городов в воде за счет только подземных вод без ущерба окружающей среде практически невозможно. Средне многолетние естественные ресурсы подземных вод по всей области в целом, включая региональную воронку депрессии, составляют около 155 м<sup>3</sup>/сек, а за пределами воронки не более 60 м<sup>3</sup>/сек. Однако, минимальные меженные среднемесячные естественные ресурсы по всей области не превышают, как будет показано ниже, 77 м<sup>3</sup>/сек, да и эти ресурсы собрать полностью естественно невозможно. Региональные потенциальные эксплуатационные запасы подземных вод с учетом неизбежной взаимосвязью поверхностных и подземных вод составляют около 90 м<sup>3</sup>/сек, то есть уже больше естественного их восполнения. Из них около 60 м<sup>3</sup>/сек подготовлены для промышленного освоения. Используется из подготовленных к освоению запасов пока 35,8 м<sup>3</sup>/сек, главным образом (33 м<sup>3</sup>/сек) в области, т.е. принципиальная возможность для наращивания использования подземных вод в целом по региону пока имеется. Вместе с тем, ряд разведанных запасов подземных вод оценены на определенный срок, т.е. рассчитаны на сработку к этому сроку.



**Рис. II.1.1. Изменения водоотбора подземных вод из основных водоносных горизонтов Московского региона**  
 (по данным «Геоцентра-Москва»)  
 Водоотборы на территории: 1 – Москвы, 2 – ЛПЗП, 3 – Московского региона

По ряду действующих водозаборов, как уже отмечено выше, этот срок уже истек. Поэтому организацию водоснабжения Московского региона на длительные и тем более неограниченные сроки невозможно осуществить без привлечения в том или ином виде поверхностного стока. При этом неизбежным фактом останется смешение поверхностных и подземных вод в водопроводной сети города, т.к. раздельное водоснабжение питьевой и технической водой в обозримом будущем признать реальным не представляется возможным. Следует также отметить, что поверхностные источники водоснабжения города пока работали на пределе своих возможностей. При существующем диспетчерском графике работы Ивановского водохранилища из него может быть подано в город максимум 78 м<sup>3</sup>/сек в год 97% обеспеченности. Вся эта вода и поступает в канал. Даже для г. Конаково, расположенного на берегу водохранилища, не было возможности взять из него 0,6 м<sup>3</sup>/сек для хозяйственно-питьевых целей города. Для этого потребовалась разведка подземных вод. Из Москов-репской системы забирается 21,9 м<sup>3</sup>/сек, т.е. около 80% ее возможностей. Здесь еще некоторые резервы увеличения водоотбора имеются. Однако при существующей системе использования этих водоисточников, т.е. при принятых ограничениях по степени водности года, реальных значительных перспектив увеличения водоподачи практически нет. Создание новых водохранилищ в столь сильно урбанизированной территории с дорогими земельными ресурсами и неизбежными недопустимыми экологическими ущербами вряд ли возможно без социальных потрясений.

Суммируя вышеизложенное, можно заключить следующее. Московский регион по своему геополитическому положению «обречен» на непропорционально быстрое экономическое развитие по сравнению с другими регионами страны. Этому способствует развитость его инфраструктуры, значительный финансовый, научный и промышленный потенциал, неуклонный рост численности и плотности населения с высокой степенью его занятости, относительно высокая суммарная эффективность производства, обеспечивающего на сегодня до 30% национального дохода страны, емкий потребительский рынок и др. Все это будет определять и неизбежный рост водопотребления в будущем, какие бы меры по снижению его удельных норм на душу населения, выводу водоемких производств за пределы региона и по экономии воды не принимались. Учитывая же тот факт, что ресурсы подземных вод (и тем более ресурсы, расположенные за пределами региональной воронки депрессии) ограничены, они не в состоянии обеспечить устойчивое во времени удовлетворение проектируемой потребности в воде. Практически неизбежным поэтому становится создание систем совместного использования поверхностных

и подземных вод. Этот наиболее современный и рациональный способ освоения водных ресурсов в целом не исключает, а наоборот позволяет высвободить часть запасов подземных вод и направить их на гарантированное обеспечение населения качественной питьевой водой на периоды вероятного заражения поверхностных вод.

В итоге концепция или стратегия водообеспечения Москвы и области может быть сформулирована следующим образом:

1). Введение по мере надобности в строй уже разведанных водозаборов подземных вод с утвержденными эксплуатационными запасами, что обеспечит гарантированный минимум (120 л/сут на человека) на случай возможного заражения поверхностных вод. В такой кризисный момент поверхностный источник водоснабжения может быть отключен и в водопровод будут поступать только подземные воды.

Создание предполагаемых крупных четырех межрайонных централизованных водозаборов в различных частях области позволит не только в значительной мере удовлетворить потребность города в подземных водах, но и обеспечить одновременно подземными водами значительное количество городов Подмосковья. С учетом совместного использования поверхностных и подземных вод производительность этих водозаборов, как будет показано ниже, может быть увеличена.

2). Рассмотрение возможности изыскания и наращивания эксплуатационных запасов подземных вод для покрытия дефицитов в хозяйственно-питьевой воде городов области. В последнем случае переоценке запасов подземных вод подлежат водозаборы, расположенные вне зоны водозаборов, где запасы подземных вод либо уже истощены, либо находятся на пределе сработки, либо загрязнены.

Наибольшие перспективы в наращивании новых запасов подземных вод имеют запад и северо-запад области, а также отдельные водозаборы востока области.

Внедрение систем совместного использования поверхностных и подземных вод даже в долинах небольших рек позволит увеличить потенциальные эксплуатационные запасы поверхностных и подземных вод в несколько раз, что может обеспечить удовлетворение потребностей в воде малых городов области.

На водозаборах, подлежащих отключению, при переоценках запасов подземных вод, могут рассматриваться также возможности перехода на другие более глубокие водоносные горизонты, переноса водозаборов на другие участки, перераспределение нагрузок на эксплуатационные скважины, а также рассмотрение вариантов водоподготовки, обеспечивающей требуемое качество подземных вод.

Решение первой и второй задачи не может быть осуществлено с должной надежностью без региональной оценки эксплуатационных запасов подземных вод, с учетом взаимодействия большинства существующих и перспективных водозаборов, региональной оценки естественных ресурсов подземных вод Московского региона и прогнозов их возможной изменчивости в будущем, а также без оценки общего водного баланса региона в целом.

3). Развитие систем совместного использования поверхностных и подземных вод в районах водохранилищ. Наибольшие перспективы здесь имеют районы существующих водохранилищ питьевого назначения, расположенные на севере и северо-западе от города. Принимая во внимание ограниченность запасов подземных вод, наиболее существенное увеличение коэффициента использования водных ресурсов можно реально получить лишь за счет увеличения водоотбора из поверхностных вод. Добиться этого можно лишь занижением расчетной обеспеченности водоподачи с погашением возникающих при этом дефицитов стока, как это уже отмечалось выше, за счет периодической кратковременной эксплуатации подземных вод. Водозаборы подземных вод для такой эксплуатации могут либо создаваться заново, либо возможно перепрофилирование действующих централизованных водозаборов малых городов на периодический режим водоотбора. Второй вариант целесообразен в случае, если совместное использование поверхностных и подземных вод способно дать существенный выигрыш в суммарном водоотборе по сравнению с раздельной эксплуатацией. В таком случае часть добавочной воды может использоваться на требуемые местные нужды. На случай заражения поверхностных вод сброс подземных вод в водохранилища может быть прекращен, а эти воды как и ранее направлены на водоснабжение городов.

4). Создание закольцованной системы водоснабжения региона в целом по принципу единой энергетической системы. Наличие некоторой асинхронности в наступлении маловодных и многоводных периодов запада и востока региона, а также различная неравномерность водопотребления в регионе позволит при этом несколько перераспределять нагрузки на различные водозаборные узлы, расположенные в различных краях региона, покрывая тем самым суммарные дефициты в воде. Кроме того, отключенные водозаборы с истощенными запасами подземных вод и с восстановленными после остановки их работы пьезометрическими уровнями, могут также периодически включаться вновь для погашения возникающих дефицитов в воде в системе в целом. В этой связи потребуется разработка методологии правил управления такой крупной водохо-

зяйственной системой в целях оптимизации использования водных ресурсов региона в целом.

5). Рассмотрение мер по повышению коэффициента использования воды за счет более обоснованного расчета санитарных попусков, учета и сокращения неизбежных утечек из водопроводов, достигающих 12–18% от подаваемых в них воды, сокращения безвозвратных потерь и норм водопотребления на различные нужды, и прежде всего на техническое водоснабжение, а также других резервов использования водных ресурсов (замкнутое водоснабжение и т.п.). Рано или поздно при решении проблем водообеспечения Московского региона неизбежно придется задействовать все эти перечисленные выше составляющие. Поэтому своевременное создание научного обеспечения реализации такой стратегии водообеспечения региона в этой связи представляет особую актуальность.

В данной работе ниже мы остановимся лишь на части из этих направлений решения проблем водообеспечения региона, основанных на создании систем совместного или комбинированного использования поверхностных и подземных вод с показом особенностей решения проблемы на конкретных примерах.

В Московском регионе могут быть реализованы различные варианты систем совместного использования поверхностных и подземных вод из перечисленных выше наиболее благоприятных для этого типов природно-техногенных условий. В том числе здесь могут быть рассмотрены особенности функционирования таких систем в районах довольно многочисленных водозаборов, расположенных в долинах малых незарегулированных и зарегулированных рек, в районах многочисленных водохранилищ питьевого назначения Волжской системы (Иваньковское, Икшинское, Пестовское, Пяловское, Акуловское (Учинское), Клязьминское, Химкинское), в районе Москворецкой системы с каскадом малых водохранилищ (Вазузское, Яузское, Верхне- и Нижне-Рузское, Озернинское, Истринское, Можайское), а также при создании межрайонных систем централизованного водоснабжения. Предварительно до рассмотрения особенностей гидрогеологических исследований в каждом из таких типов природных и природно-техногенных условий целесообразно охарактеризовать потенциальные возможности ресурсов подземных вод региона и особенностей их формирования.

---

## *Глава 6*

# **ЗАКОНОМЕРНОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД МОСКОВСКОГО РЕГИОНА**

Одним из основных аспектов проблемы совместного использования поверхностных и подземных вод является обоснование возможностей и гарантированности погашения дефицитов поверхностного стока за счет форсированной эксплуатации подземных вод. В этой связи прежде всего необходимо оценить имеющиеся в регионе естественные ресурсы подземных вод и на этой основе охарактеризовать гарантированность возобновления срабатываемых в дефицитные периоды запасов подземных вод естественным их питанием. Решение этой задачи, таким образом, основывается на определении естественного питания или естественных ресурсов подземных вод, а также на изучении закономерностей возможной сезонной и многолетней изменчивости этих ресурсов. В этой связи представляется важным как рассмотреть закономерности формирования режима и ресурсов подземных вод, так и осуществить региональную оценку естественных ресурсов подземных вод Московского региона. При этом изучение закономерностей формирования режима и ресурсов подземных вод необходимо как для обоснования принимаемых допущений и получения исходных данных для вероятного моделирования прогнозных рядов, уровней и расходов подземных вод (см. гл. 3), так и для осуществления оценок собственно ресурсов подземных вод и возможностей их использования, то есть для получения представлений о потенциальных возможностях подземных вод различных регионов области компенсировать дефициты поверхностного стока и восполнять сработанные за многоводные периоды запасы до очередного маловодного периода.



Следует подчеркнуть, что если оценки естественных ресурсов подземных вод по региону, хотя и малодостоверные, о чем будет сказано ниже, но все-таки в прошлом проводились, то исследований закономерностей многолетней изменчивости режима и ресурсов подземных вод по региону до сих пор не было. Поэтому рассмотрим эти вопросы последовательно.

В связи с сравнительно небольшими с региональных позиций размерами региона, имеющего площадь с радиусом всего около 100–125 км, данная территория характеризуется довольно однородными климатическими условиями. В том числе среднесуточные атмосферные осадки на площади Московской области изменяются всего в пределах 550–650 мм/год с некоторой закономерностью их уменьшения в указанных пределах с запада на восток. Испарение составляет здесь также почти на всей площади около 60–65% от осадков. Поверхностный, включая подземный сток, в пределах региона в соответствии с незначительной изменчивостью приходных статей водного баланса также изменяется в небольших пределах от 160 до 200 мм/год при модулях речного стока от 4,5 до 7 л/сек·км<sup>2</sup> и коэффициенте стока – 0,2–0,3. Таким образом, наблюдаемые различия в формировании режима подземных вод и подземного стока могут быть обусловлены главным образом различием гидрогеологических и орографических или в целом ландшафтных условий территории.

Изученность естественного режима подземных вод Московской области, несмотря на значительную в целом наблюдательную сеть, оставляет все еще желать лучшего. Большая часть наблюдательных скважин расположена в черте города и поэтому даже в тех случаях, когда наблюдательные скважины находятся на лесопарковых территориях (ТСХА, Измайлово, Останкино и др.), данные по ним в той или иной мере несут черты урбанизации. За пределами города наблюдательная сеть довольно редка (рис.6.1) и поэтому лишь в единичных случаях можно найти скважины в пределах изучаемых водосборов, которые можно использовать для корректного расчленения гидрографов рек при оценках ресурсов подземных вод. Наиболее качественный материал наблюдений, по которым можно изучать закономерности естественного режима подземных вод, до сих пор получен со стационара ВСЕГИНГЕО в п. Щемилово, а также со стационара Гидрометцентра в Сареево (бассейн р. Медвенки).

В соответствии с принципами районирования территорий по условиям формирования режима подземных вод [24] московский регион целиком относится к провинции сезонного преимущественно летнего и

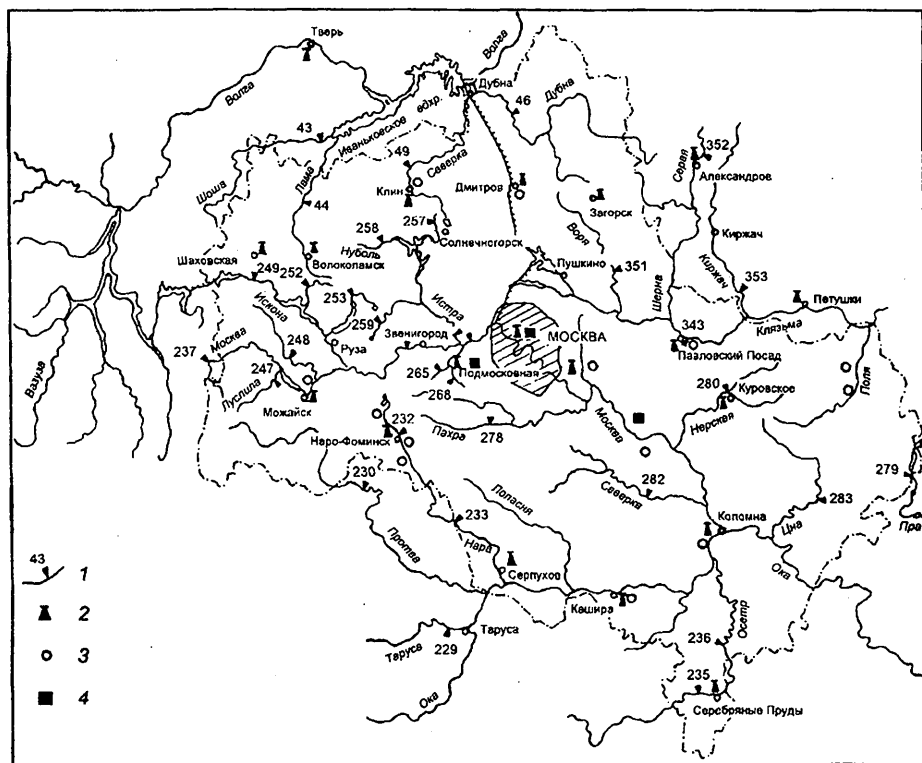


Рис. 6.1. Схема гидрорежимной изученности Московского региона

1 – гидропосты и их номера; 2 – метеостанции; 3 – наблюдательные скважины; 4 – группы наблюдательных скважин

частично осеннего питания подземных вод и к зоне умеренного питания с соотношением осадков и испарения  $P/E = 1,2-1,4$ ,  $P-E = 160-200$  мм/год, а также к области умеренно дренированных подземных вод с глубиной эрозийного вреза от 50 до 160 м, с наибольшей расчлененностью рельефа в районах с максимальными абсолютными отметками поверхности земли до 250–320 м на Клинско-Дмитровской и Волоколамской гряде и значительно меньшей расчлененностью рельефа в районах низин с отметками поверхности земли до 70–80 м, т.е. в долинах рек Оки и Волги в пределах соответственно Мещерской низменности на юго-востоке и Верхне-Волжской низины на севере.

Для внутригодового режима уровней грунтовых вод в данной климатической зоне характерно стабильное промерзание зоны аэрации не редко до глубин 0,8–1,2 м, чаще около 0,8–0,5 м и поэтому отсутствие зимнего питания подземных вод и постоянное в это время снижение уровней грунтовых вод.

Последующая за этим сосредоточенная весенняя инфильтрация талых вод является основным периодом питания подземных вод. Летние осадки в большей части расходуются на склоновый сток и испарение из зоны аэрации и поэтому за исключением наиболее дождливых лет в этот период на большей части территории отмечается устойчивое снижение уровней грунтовых вод и соответствующее сокращение поверхностного стока. Лишь при небольших ( $< 1$  м) глубинах залегания уровней грунтовых вод, т.е. на переувлажненных землях и заболоченных территориях, летние осадки постоянно достигают грунтовых вод, создавая пилообразный характер кривых колебаний их уровней. Осенние осадки при проникаемой зоне аэрации чаще всего определяют второй период сезонного питания подземных вод. Однако в зависимости от степени интенсивности выпадения этих осадков, глубин залегания грунтовых вод и степени проницаемости зоны аэрации осенние максимумы в колебаниях уровней грунтовых вод могут и отсутствовать. Таким образом, наиболее характерным графиком режима уровней грунтовых вод в обобщенном виде можно считать типы *a* и *б* (см. рис.3.2). Примеры конкретных графиков внутригодового режима уровней грунтовых вод при различных глубинах их залегания приведены на рисунке 6.2. Как видно из данного рисунка амплитуды колебаний уровней грунтовых вод зависят от глубины залегания грунтовых вод. При малых ( $< 1$  м) глубинах величина амплитуды лимитируется мощностью зоны аэрации, т.е. выходом грунтовых вод на поверхность земли. Уменьшение же амплитуд с глубиной определяется как расходом части инфильтрующихся осадков на насыщение зоны аэрации (с полевой до максимально молекулярной влагоемкости),

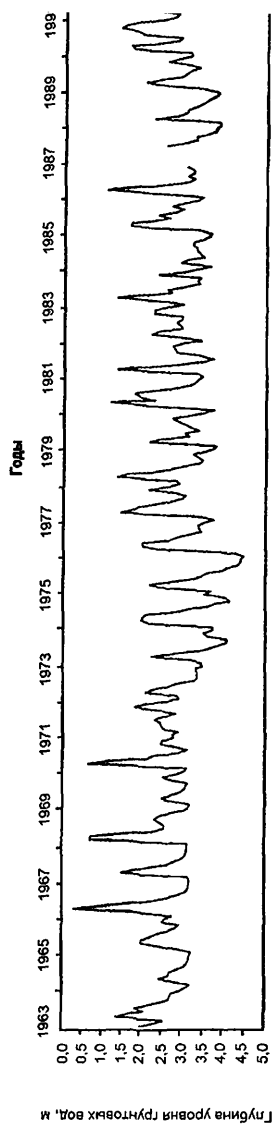
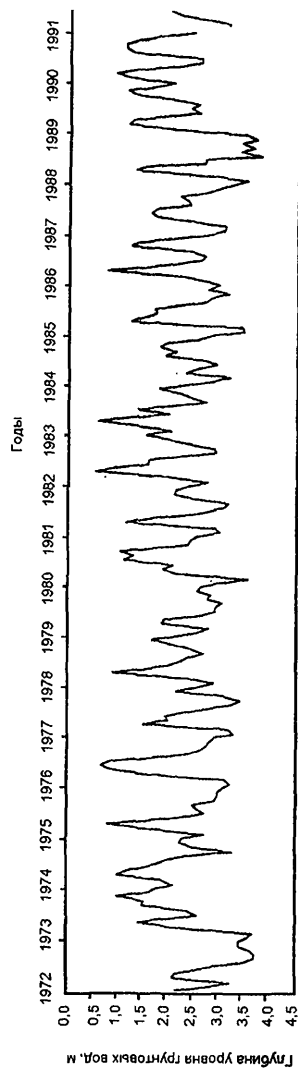


Рис. 6.2. Характерные графики режима уровней грунтовых вод Подмосковья  
*а* – скв. 205 (Дмитров); *б* – скв. 214 (Павловский Посад); *в* – скв. 233 (Коломна); *г* – скв. 618 (Кривандински

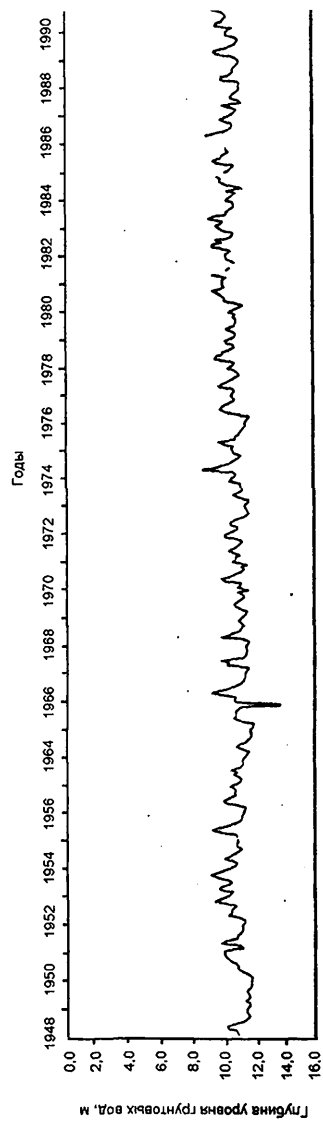
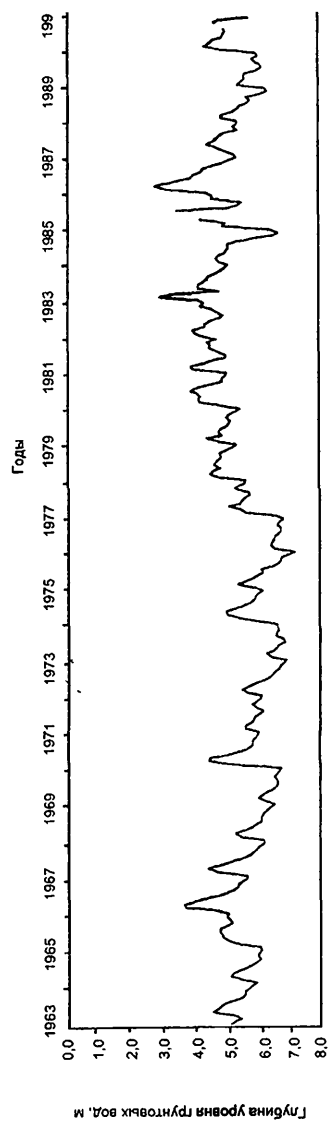


Рис. 6.2. (окончание)

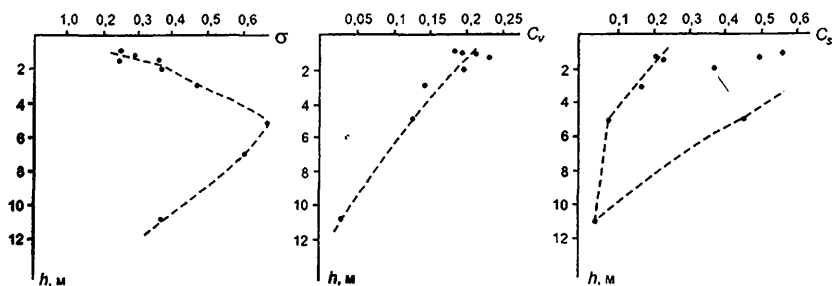


Рис. 6.3. Графики зависимости  $\sigma$ ,  $C_v$  и  $C_s$  от среднееголетней глубины залегания уровней грунтовых вод  $h$

так и рассредоточением питания подземных вод во времени. Максимальные амплитуды, а следовательно сезонная и многолетняя изменчивость уровней грунтовых вод, наблюдается при глубинах от 1,5–2 м до 4 м. Соответственно с этим отмечается и закономерная изменчивость основных статистических параметров рядов гидрогеологических наблюдений от глубины залегания подземных вод (рис. 6.3), что позволяет использовать подобные зависимости при выборе данных параметров для прогноза режима подземных вод в условиях нестационарности, т.е. в условиях закономерных трендовых изменений глубин залегания грунтовых вод во времени. Как видно из рисунка 6.3 с увеличением глубин залегания уровней грунтовых вод коэффициент вариации ( $C_v$ ) и асимметрии ( $C_s$ ) имеют тенденцию к уменьшению, а среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) сначала растет в соответствии с закономерностью роста амплитуд колебаний уровней, а затем уменьшается. Степень внутрирядной взаимосвязанности или автокоррелированности рядов не имеет четко выраженной закономерности изменений. Здесь можно лишь отметить некоторую тенденцию к ее увеличению с глубиной (но огибающей поля точек).

Подобная закономерность изменений характера внутригодового режима уровней грунтовых вод отмечается не только на территориях с различными глубинами залегания грунтовых вод, но и в одном и том же месте (т.е. в одной скважине) в годы различной водности, когда уровни грунтовых вод в процессе их многолетней изменчивости залегают на различных глубинах от поверхности земли. На рисунке 6.4 приведены примеры внутригодовой изменчивости уровней грунтовых вод по рассчитанным среднемесячным их значениям различной обеспеченности.

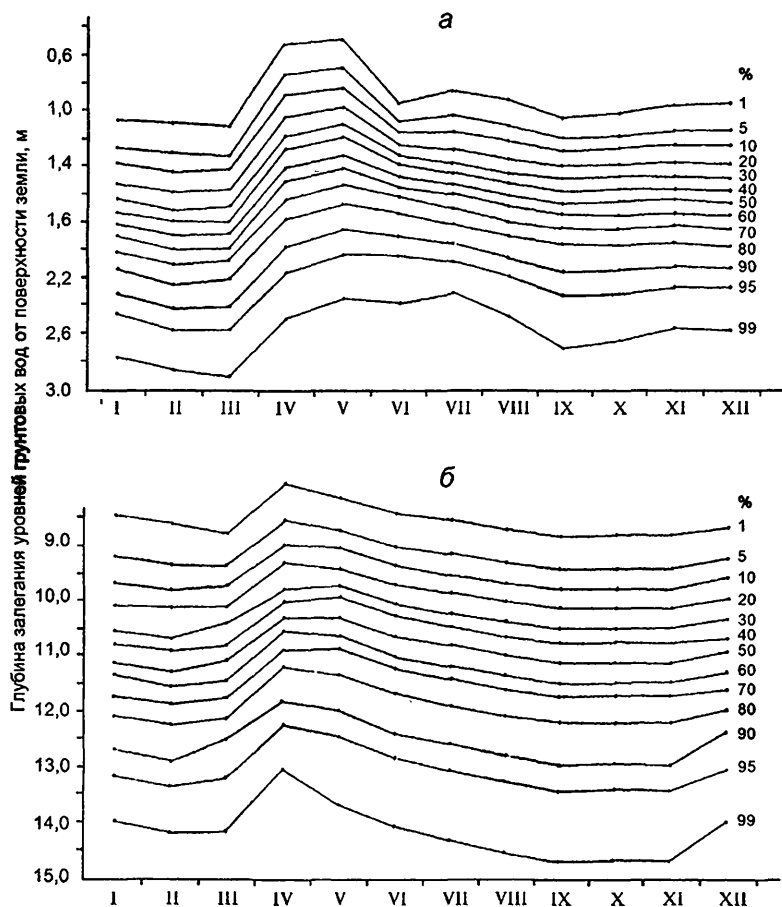


Рис. 6.4. Графики зависимости характера внутригодового распределения уровней грунтовых вод по скважинам 21 (а) и 44(б) в пос. Щемилово от степени водности года, выраженной в % обеспеченности

Для построения таких графиков рассчитывались графики обеспеченности по рядам из среднемесячных значений каждого месяца за весь период многолетних наблюдений и с этих графиков снимались значения глубин залегания уровней грунтовых вод заданной обеспеченности по

всем месяцам года. Как видно из этих графиков и амплитуды и сроки наступления экстремумов и сам характер графиков внутригодового режима в годы различной водности (обеспеченности) могут быть весьма различными, что следует учитывать в прогнозах и при моделировании рядов.

Как уже отмечалось выше, для оценок характера внутригодового распределения уровней или расходов поверхностных и подземных вод для лет различной водности используется не редко так называемый способ «фрагментов» [57, 58]. Для этого из ряда имеющихся наблюдений выбирается год требуемой обеспеченности по среднегодовым значениям стока (уровней) и прогнозный характер внутригодового распределения стока (уровней) принимается по фактически наблюдавшемуся внутригодовому его распределению в пределах такого года.

Сопоставление выбранных таким способом лет 10, 50 и 90% обеспеченности уровней грунтовых вод с полученными расчетными вероятностными значениями уровней соответствующей водности показало, что их соотношение может быть весьма различным, т.е. как выше так и ниже одних относительно других (рис.6.5). Можно лишь отметить, что для лет высокой водности расчетные среднемесячные уровни чаще оказываются выше фактических, а для лет низкой водности – наоборот. При этом разброс фактических и расчетных значений с глубиной сокращается.

Все это позволяет сделать вывод о возможном применении как того, так и другого способа для анализа и прогнозов внутригодового распределения уровней грунтовых вод с некоторой предпочтительностью предлагаемого нами первого варианта, создающего некоторый запас «прочности» для выполняемых расчетов и оценок.

При этом расчетные уровни обладают в какой-то мере и большей надежностью или гарантированностью, т.е. обладают меньшим элементом случайности. Так, например, при составлении графиков типа графика (рис.6.5) в разных скважинах пос. Щемилово годами 10% водности оказались 1953, 1981 и 1983, а годами 50% водности – 1969, 1966 и 1963, что для столь малой в региональном масштабе площади трудно объяснить. Лишь годом 90% обеспеченности во всех случаях оказался 1969, что вполне логично. Соответственно и характер внутригодовой изменчивости уровней в разные годы при таком способе оценок нельзя признать однозначным.

Графики подобные рисунку 6.4 позволяют оценить и характер возможной изменчивости сезонных амплитуд уровней грунтовых вод в годы различной водности при различных среднегодовых глубинах их залегания. Интерес здесь представляют прежде всего амплитуды весеннего и



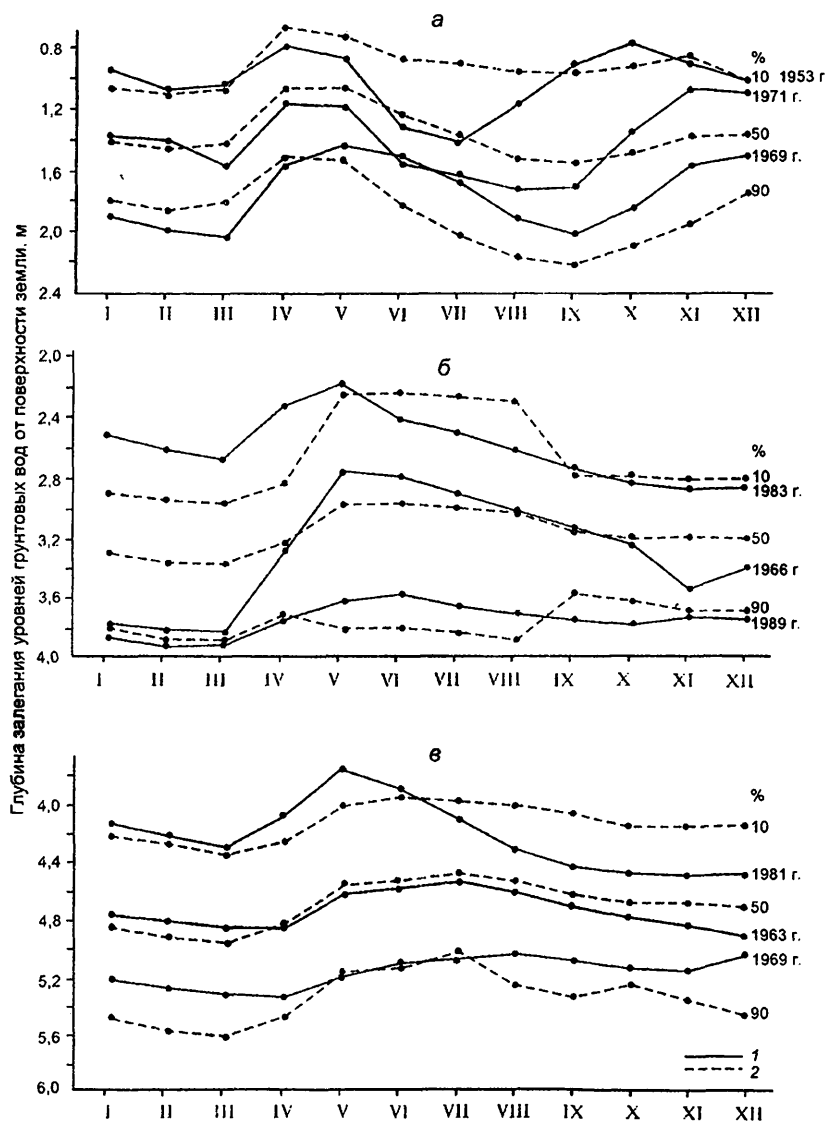


Рис. 6.5. Сопоставление графиков фактических (1) и расчетных (2) уровней грунтовых вод по скважинам 19 (а), 15/50 (б) и 25 (в)

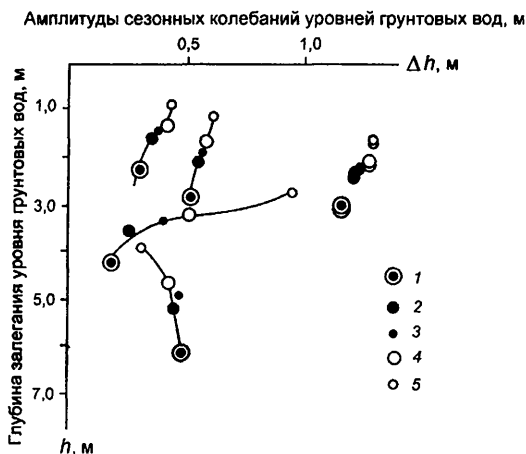


Рис. 6.6. Графики зависимости амплитуд колебаний уровней грунтовых вод по ряду скважин Шемилово от глубины их залегания в годы различной водности, выраженной в процентах обеспеченности

Водоносность (%): 1 – 90, 2 – 70, 3 – 50, 4 – 30, 5 – 10

осеннего подъема уровней грунтовых вод, часто используемые для оценок инфильтрационного питания подземных вод, а также размах многолетней изменчивости среднегодовых значений уровней подземных вод. Последний может быть оценен по графикам обеспеченности среднегодовых значений уровней для любых, представляющих практический интерес интервалов от 1 до 99%, 5–95% или 10–90%. Как видно из графиков типа рисунков 6.4 и 6.6, как сезонные, так и многолетние амплитуды колебаний уровней грунтовых вод имеют довольно четкую закономерность изменений в зависимости от глубины залегания грунтовых вод в годы любой водности. При этом среднеемноголетние амплитуды (50% обеспеченности) чаще всего сначала растут до глубин около 3 м, а затем уменьшаются, что можно объяснить практическим отсутствием на больших глубинах испарения с поверхности грунтовых вод. Максимум сезонных амплитуд колебаний уровней грунтовых вод также отмечается на глубинах 2–3 м, после чего они затухают.

Соотношение среднеемноголетних сезонных и многолетних амплитуд колебаний уровней также перемененно и зависит от глубины залегания грунтовых вод (рис. 6.7). При глубинах до воды менее 3,5 м оно, как правило, больше единицы, а при больших глубинах – меньше единицы.

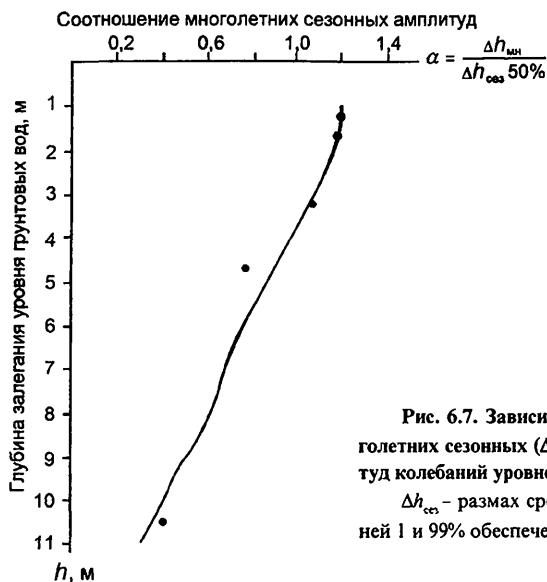


Рис. 6.7. Зависимость соотношения среднелетних сезонных ( $\Delta h_{\text{сез}} 50\%$ ) и многолетних амплитуд колебаний уровней от глубины их залегания

$\Delta h_{\text{сез}}$  – размах среднегодовых значений уровней 1 и 99% обеспеченности

Эти соотношения характерны для естественного режима подземных вод данной зоны и отклонения от них могут служить одним из критериев соответствия наблюдаемых в том или ином районе изменений уровней грунтовых вод над фоновыми их характеристиками с соответствующей оценкой степени нарушенности режима подземных вод.

Наблюдаемые закономерности сезонных и многолетних колебаний уровней грунтовых вод могут быть использованы для соответствующих оценок изменчивости естественного питания и естественных ресурсов подземных вод. Эту задачу можно решать как по серии определенным образом расположенных наблюдательных скважин, так и по одиночным скважинам [3, 22, 28 и др.]. При этом в любом варианте годовое питание подземных вод ( $w$ ) оценивается как  $\sum \Delta h_i \cdot \mu$ , где  $\Delta h_i$  – внутригодовые колебания уровней, главными из которых являются весенние и осенние амплитуды, а  $\mu$  – водоотдача пород. Частное от деления питания на атмосферные осадки, выраженных в миллиметрах слоя воды ( $w/P = k\%$ ), определяет коэффициент инфильтрационного питания, то есть долю атмосферных осадков, идущих на питание подземных вод. В том числе, используя значение амплитуд колебаний уровней для лет различной водности (см. рис.6.6.), можно определить возможный диапазон изменений

и инфильтрационного питания подземных вод и доли участия осадков в этом питании. По аналогичным зависимостям, построенным за различные по продолжительности периоды наблюдений, можно установить закономерности изменчивости этих параметров во времени.

Так, например, по данным наблюдений до 1975 г. [42] на севере области среднегодовое инфильтрационное питание составляло 50–60 мм/год, а на юге – 30–50 мм/год, то есть в среднем по региону около 50 мм/год. Коэффициент инфильтрационного питания в зависимости от глубины залегания грунтовых вод в районе Пехорско-Купавинского междуречья по данным этого автора менялся следующим образом: 1 м – 2,3%; 2 м – 7,7%; 3 м – 8,3%; 5 м – 6,0%; и 10 м – 1,6%. Таким образом, максимальное участие осадков в питании подземных вод отмечается при глубинах залегания около 3 м и составляет 55 мм/год. Такое питание могло бы обеспечить подземный сток с модулем 1,75 л/сек. Однако, по данным Н.А. Лебедевой [42], средний из четырех наблюдавшихся в этом регионе рек (Пра, Спас Клепики, Цна и Поля) модуль подземного стока составил лишь 1,3 л/сек·км<sup>2</sup>, то есть в 1,3 раза меньше естественных ресурсов подземных вод. Это определяется значительным испарением с поверхности грунтовых вод при малых глубинах их залегания, снижающих в 2–3 раза коэффициент инфильтрационного питания.

Интересно отметить, что и сейчас при изменившихся условиях формирования подземных вод, о чем еще будет сказано ниже, такое же соотношение питания и подземного стока сохранилось. Так, например, сумма весенних и осенних амплитуд колебаний уровней для года 50% обеспеченности составил в этом же регионе 780 мм (см. рис.3.2), что при  $\mu = 0,15$  дает питание  $w = 117$  мм/год или 3,7 л/сек·км<sup>2</sup>. Средний же модуль подземного стока в регионе по имеющимся на сегодня данным (р. Нерская и р. Пра, Деулино) составил 2,7 л/сек·км<sup>2</sup>, то есть тоже в 1,3 раза меньше, чем по данным наблюдений за режимом уровней подземных вод. Изменились при этом и коэффициенты инфильтрационного питания с 9 до 15%, что свидетельствует об увеличении доли участия осадков в питании подземных вод при увеличении осадков, что важно знать при прогнозах режима подземных вод в связи с изменяющимися климатическими условиями.

Сроки наступления экстремальных положений уровней грунтовых вод варьируют в значительных пределах, что подчеркивает существующую роль случайности в данном процессе. Так, наиболее ранние сроки наступления предвесеннего минимума (условно принятые за 90% обеспеченность) приходятся на начало марта (1–8 марта), среднесезонные – 19–25 марта, а наиболее поздние сроки (10% обеспеченности) приходятся на нача-

ло апреля (4–9 апреля). Размах зафиксированных дат наступления предвесенних минимумов (от 22 февраля до 9 апреля) составляет таким образом 48 суток.

Наиболее ранние сроки наступления весеннего максимума (90% обеспеченности) при глубинах залегания уровней грунтовых вод до 3 м приходится на середину апреля (11–14 апреля), среднемноголетние – на первую половину мая (1–20 мая), а наиболее поздние (10% обеспеченности) – на последнюю декаду июля (22–25 июля). Размах колебаний дат для весеннего максимума еще больше и достигает 114 суток (от 11 апреля до 4 августа).

Даты осенне-зимнего минимума 90% обеспеченности приходятся на конец сентября – середину октября, среднемноголетние – на середину ноября, а наиболее поздние – на середину – конец декабря (рис. 6.8). Размах дат составляет около 95 суток.

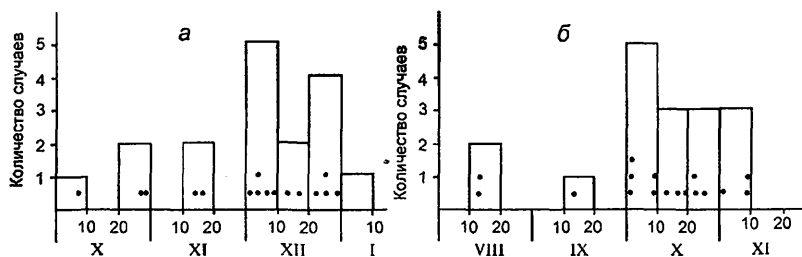


Рис. 6.8. Гистограммы времени наступления осеннего максимума (а) и начала осеннего подъема уровней грунтовых вод (б) по скв. 30, пос. Шемилово

Характерные эмпирические графики обеспеченности сроков экстремальных положений уровней приведены на рисунке 6.9. Как видно из рисунка, даты экстремумов предвесеннего минимума и весеннего максимума распределены во времени довольно равномерно и лишь отдельные группировки точек позволяют выделить наиболее часто встречаемые сроки появления этих экстремумов. Группирование точек осенне-зимнего минимума в конце года свидетельствует о фактическом отсутствии осеннего минимума и о продолжающемся спаде уровней до конца гидрологического года, то есть до очередного предвесеннего минимума.

Какой-либо определенной зависимости между сроками наступления экстремальных положений уровней не устанавливается. Можно лишь говорить о слабых тенденциях к таким связям (рис. 6.10).

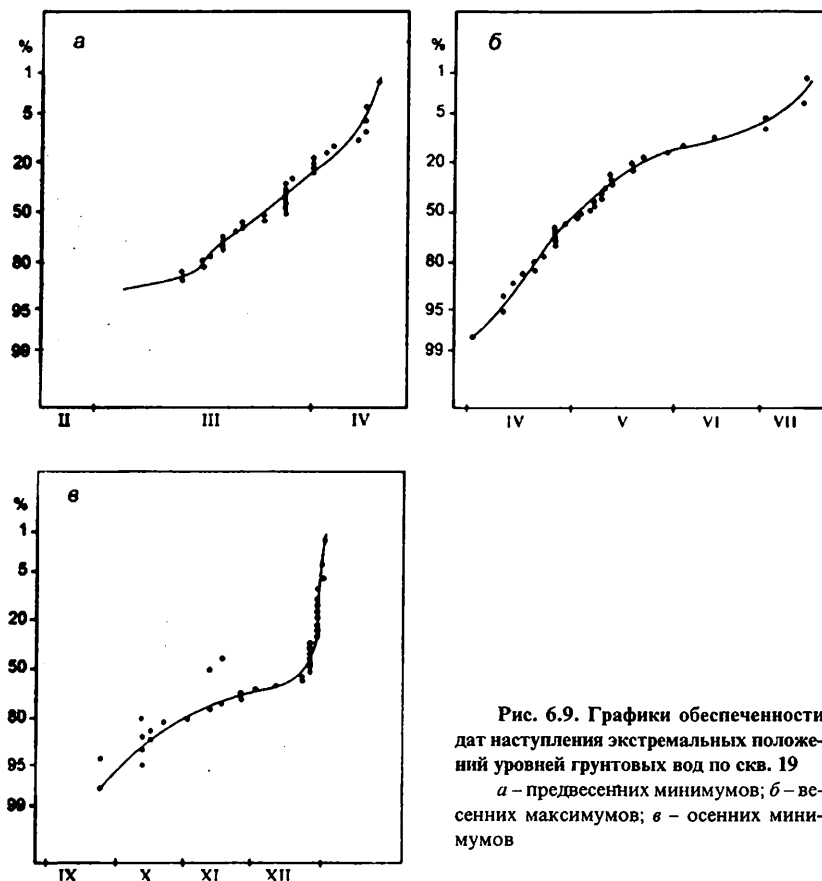


Рис. 6.9. Графики обеспеченности дат наступления экстремальных положений уровней грунтовых вод по скв. 19  
а – предвесенних минимумов; б – весенних максимумов; в – осенних минимумов

Не отмечено также какой-либо закономерной зависимости сроков наступления предвесенних минимумов от глубины залегания грунтовых вод. Это, по-видимому, связано с тем, что начало весеннего подъема уровней грунтовых вод не всегда фиксируется именно в момент достижения инфильтровавшихся талых вод до поверхности грунтовых вод, а может быть вызвано передачей напоров от участков с меньшими глубинами до воды, где питание подземных вод уже началось. Поэтому сроки начала весеннего подъема уровней грунтовых вод независимо от глубины их залегания отмечаются практически одновременно при устойчивом переходе температур воздуха через ноль.

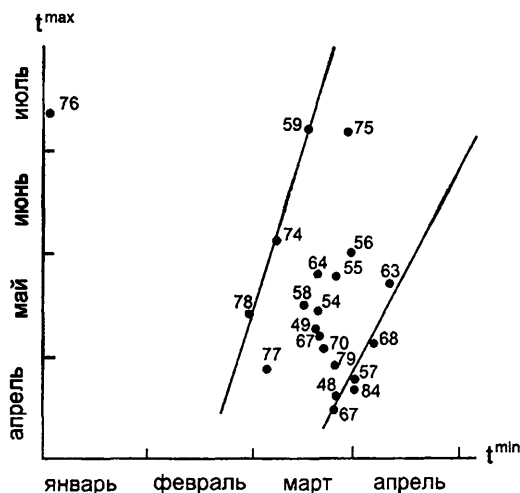


Рис. 6.10. Зависимость сроков наступления весеннего максимума ( $t^{\max}$ ) от сроков наступления предвесеннего минимума ( $t^{\min}$ ) в указанные цифры на графике годами

Для весенних максимумов зависимость дат их наступления от глубины залегания грунтовых вод довольно четко прослеживается как по региону в целом, так и в каждом конкретном пункте (табл.6.1).

Таблица № 6.1

Зависимость сроков наступления весенних максимальных уровней грунтовых вод от глубины их залегания по ряду скважин Подмоскovie

| №№ скважин | Глубины залегания уровней грунтовых вод различной обеспеченности |       | Сроки наступления весеннего максимума, месяц |
|------------|------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------|
|            | %                                                                | м     |                                              |
| 25         | 10                                                               | 3,8   | V                                            |
|            | 50                                                               | 4,58  | VII                                          |
|            | 90                                                               | 5,08  | VIII                                         |
| 44         | 10                                                               | 9,58  | IV                                           |
|            | 50                                                               | 9,61  | V                                            |
|            | 90                                                               | 11,09 | VI                                           |
| 19         | 10                                                               | 2,22  | V                                            |
|            | 50                                                               | 2,78  | V                                            |
|            | 90                                                               | 3,6   | VI                                           |
| 15/50      | 10                                                               | 0,81  | IV                                           |
|            | 50                                                               | 1,19  | IV                                           |
|            | 90                                                               | 1,46  | V                                            |

Как видно из таблицы, даже на сравнительно локальных территориях и даже в одной и той же скважине, сроки наступления максимумов могут сдвигаться до 2-х месяцев при увеличении глубины залегания поверхности грунтовых вод в отдельные маловодные и многоводные периоды.

Все эти закономерности могут быть использованы при построениях рядов многолетней изменчивости уровней подземных вод на основе динамико-стохастического способа моделирования (см. гл. 3).

Среди многолетних закономерностей режима уровней подземных вод, а также подземного стока, представляющих методический интерес с позиций их учета для прогнозов вероятной многолетней изменчивости питания подземных вод, моделирования многолетних гидрогеологических временных рядов и оценок вероятной изменчивости ресурсов подземных вод, целесообразно рассмотреть реальность существования и степень достоверности выделяемых многолетних трендов, цикличности или периодичности чередований маловодных и многоводных серий, установить характер законов распределения уровней и расходов подземных вод, а также определить степень внутрирядной взаимосвязанности членов многолетних рядов.

Генетической предпосылкой возникновения многолетних трендов в уровнях и расходах подземных вод служит появление трендов в атмосферных осадках, связанных с климатическими изменениями (рис.6.11).

Как видно из рисунка, почти по всему Московскому региону отмечается тенденция к росту атмосферных осадков, либо за весь период имеющихся наблюдений, либо наиболее заметно в последние десятилетия. В ряде случаев этот рост довольно ощутим и достиг за последние 20–30 лет более 100 мм, т.е. свыше 15–20% от среднемноголетней нормы осадков, оцененной за инструментальный период наблюдений.

Анализ значимости многолетних трендов в атмосферных осадках производился как по полным рядам наблюдений, так и по искусственно разрезанным половинкам рядов (табл. 6.2).

Как видно из таблицы, все полные ряды наблюдений показали статистическую значимость трендов. Первые половины рядов за 1936–1966 гг. оказались на грани незначимости и значимости трендов, что определяется существенной дисперсией годовых осадков. Градиенты же трендов вторых половин рядов оказались существенно выше первых. Коэффициенты корреляции этих интервалов данных также показали более высокую и несомненную статистическую значимость.

Это обстоятельство позволяет заключить, что наиболее значимые климатические изменения, судя по атмосферным осадкам, начали прояв-



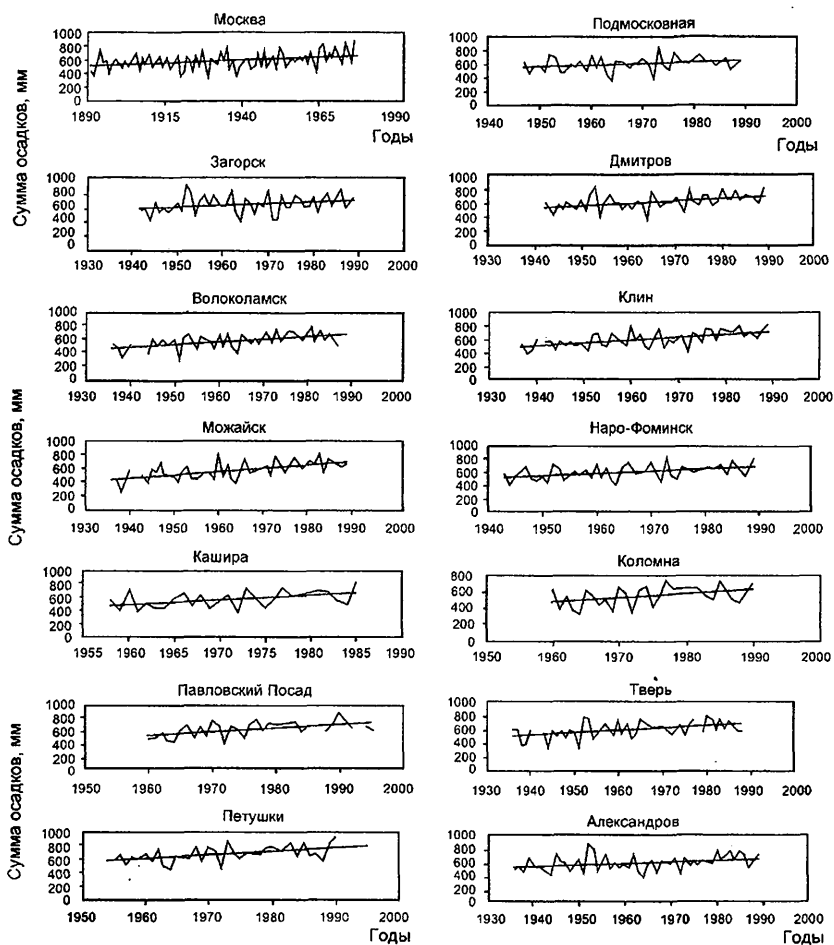


Рис. 6.11. Характер многолетней изменчивости атмосферных осадков в пределах Московской области

ляться в пятидесятых-шестидесятых годах, что выразилось в среднем росте осадков до 4–6 мм/год. Более четко эта тенденция проявляется по наиболее продолжительным рядам наблюдений за атмосферными осадками, имеющихся в Москве (рис.6.12).

Таблица № 6.2

Зависимость трендовых характеристик в рядах атмосферных осадков Московской области от продолжительности наблюдений

| Метеопост   | Период наблюдений<br>годы | Градиент тренда,<br>мм/год | Коэффициент корреляции тренда ( $r$ ) | Длина ряда<br>$n$ лет | Статистическая значимость $r$ при $n$ лет |
|-------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|
| Клин        | 1937–1989                 | 4,11                       | 0,61                                  | 53                    | 0,272                                     |
|             | 1937–1963                 | 4,77                       | 0,44                                  | 27                    | 0,381                                     |
|             | 1963–1989                 | 7,88                       | 0,61                                  | 27                    | 0,381                                     |
| Можайск     | 1936–1989                 | 4,36                       | 0,62                                  | 54                    | 0,269                                     |
|             | 1936–1963                 | 3,89                       | 0,32                                  | 28                    | 0,373                                     |
|             | 1963–1989                 | 5,73                       | 0,48                                  | 27                    | 0,381                                     |
| Волоколамск | 1936–1989                 | 3,46                       | 0,55                                  | 54                    | 0,269                                     |
|             | 1936–1963                 | 3,55                       | 0,31                                  | 28                    | 0,373                                     |
|             | 1963–1989                 | 4,29                       | 0,40                                  | 27                    | 0,381                                     |

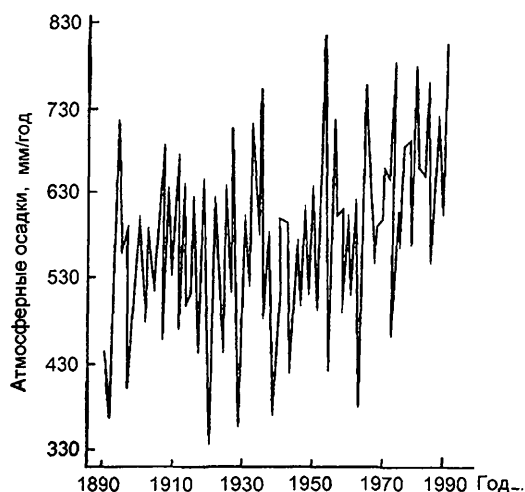


Рис. 6.12. Характер многолетней изменчивости атмосферных осадков в г. Москве

Заметить изменения в питании грунтовых вод по амплитудам колебаний их уровней не представляется возможным, т.к. они могут измеряться лишь первыми миллиметрами в год, что легко представить задавшись коэффициентом питания в 10–15% от прироста атмосферных осадков. На фоне неравномерного от года к году питания подземных вод уловить эту прибавку трудно.

Более того, в ряде случаев амплитуды основного весеннего питания грунтовых вод могут даже уменьшиться, т.к. климатические изменения несколько меняют условия их питания. Появление большего числа зимних оттепелей, а также сдвиг весеннего перехода температур воздуха через ноль на более ранние сроки, а осеннего перехода на более поздние сроки, растягивает питание во времени. В итоге питание подземных вод за холодный период года возрастает, а весеннее может даже и снижаться.

Однако многолетнее суммирование этих незаметных приращений приводит к увеличению мощности и соответственно расхода потока подземных вод.

Таким образом, судить о многолетней изменчивости питания подземных вод в каждом конкретном месте можно лишь по трендам в их уровнях и расходах, суммирующих питание за год и за многолетие в целом. Анализ имеющихся рядов наблюдений по значительной их части в уровнях грунтовых вод отмечается положительный тренд (рис.6.13). Одновременно в отдельных случаях в результате различной техногенной деятельности (водоотбор, дренаж, планировка территории и т.п.) на части рядов отмечается отрицательный тренд.

Наряду с этим имеются ряды наблюдений за уровнями подземных вод, где вообще каких-либо трендов не устанавливается как в силу их незначительности, так и инерционности системы.

Поэтому судить о суммарной изменчивости подземного питания во времени на водосборе в целом реально можно лишь по фиксируемому в реках меженному подземному стоку, интегрирующему питание подземных вод за ряд лет [28, 29].

В меженном подземном стоке, оцениваемом по зимним расходам рек, многолетние положительные тренды начали проявляться наиболее заметно в 70-х годах текущего столетия практически по всему региону. Интенсивность или градиент тренда в относительно ненарушенных условиях составляют всего 0,017–0,05 л/сек·км<sup>2</sup> в среднем 0,03 л/сек·км<sup>2</sup>.

Климатологический вклад в наблюдаемой трендовой составляющей увеличения подземного стока можно приближенно оценить через коэффициент подземного стока и градиент тренда в атмосферных осадках. Так, если принять среднемноголетние атмосферные осадки по району в 600 мм/год (см. рис.6.11), а средний по региону модуль подземного стока в 2,54 л/сек·км<sup>2</sup> или 80 мм/год, то коэффициент подземного стока или доля участия осадков в питании подземных вод составит 7,5%. Исходя из этого коэффициента и приняв средний градиент тренда в осадках в 4 мм/год (см. табл.6.2) можно оценить также средний градиент подземного стока в 0,3 мм/год или 0,01 л/сек·км<sup>2</sup> в год. Сопоставляя этот результат с факти-

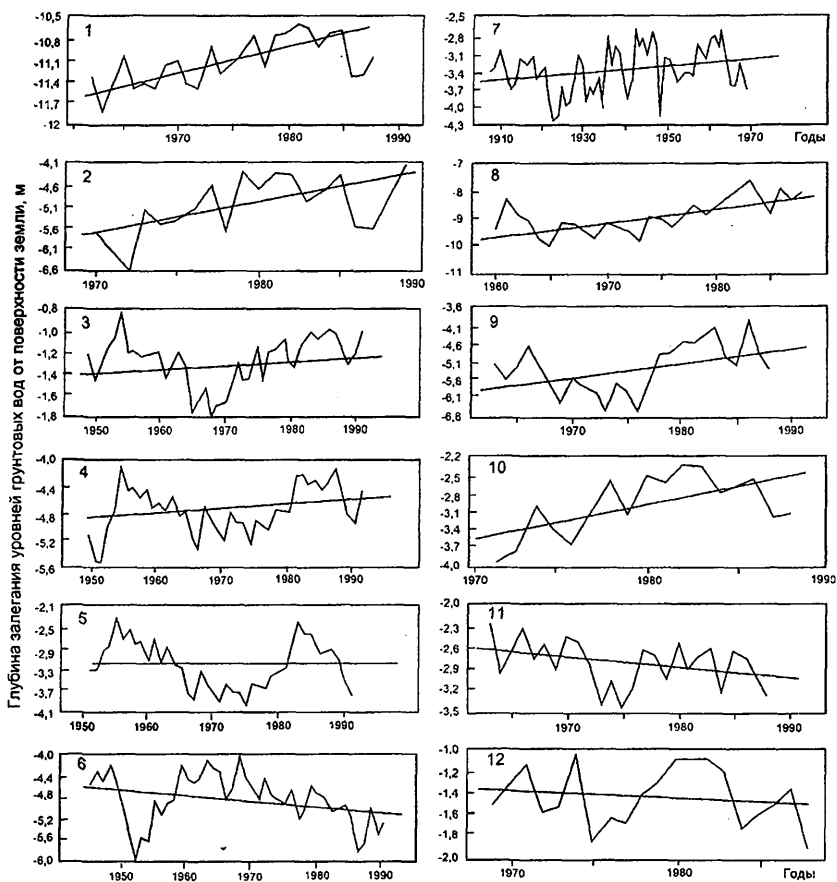
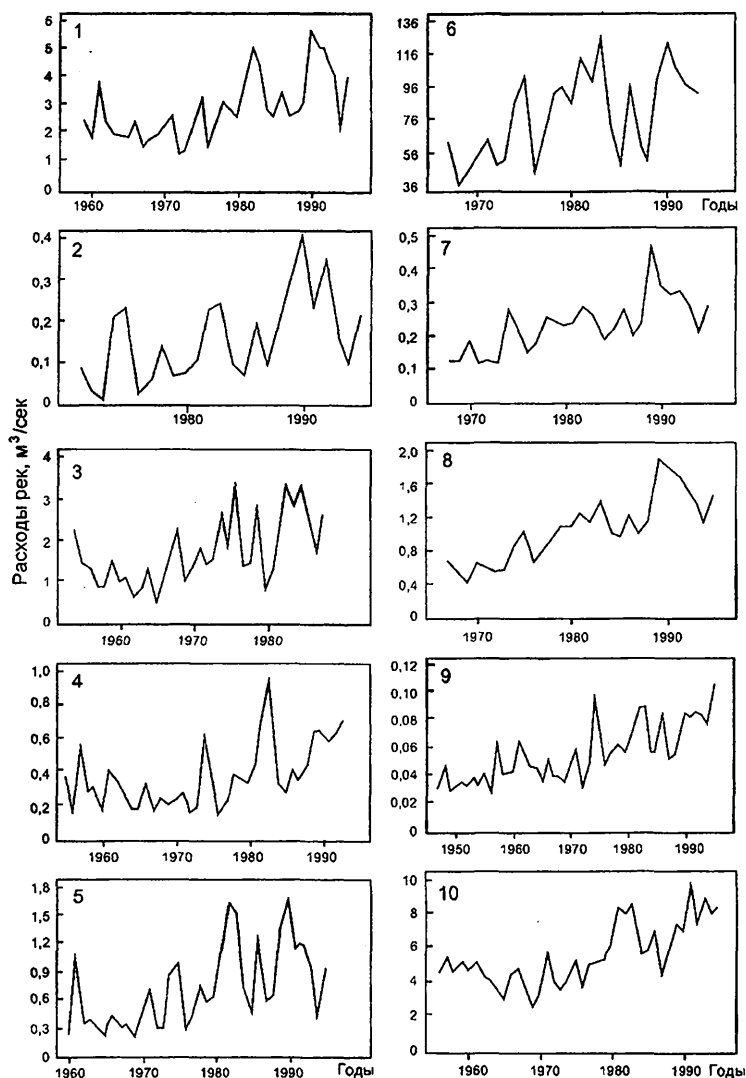


Рис. 6.13. Графики многолетней изменчивости уровней грунтовых вод по ряду скважин Московской области

Пос. Шемилово: 1 – 44, 2 – 44а, 3 – 48, 4 – 25, 5 – 19; 6 – Москва-Тушино; 7 – ТСХА; 8 – Можайск; 9 – Коломна; 10 – Котово; 11 – Павловский Посад; 12 – Дурново

ческими результатами наблюдений можно заключить, что изменениями климата или атмосферных осадков можно объяснить лишь минимальные наблюдаемые тренды в подземном стоке, являющиеся статистически незначительными (рис.6.14). Все более существенные значения трендов



**Рис. 6.14. Хронологические графики зимних меженных расходов рек со слабо нарушенным режимом**

1 - Лама, Егорье; 2 - Волошня, Чертаново; 3 - Москва, Барсуки; 4 - Лусьянка, Черники; 5 - Исконя, Новинки; 6 - Нудоль, Кузнецово; 7 - Катыш, Троицкое; 8 - Малая Истра, Киселево; 9 - Медвенка, Большое Сареево; 10 - Осетр, Маркино

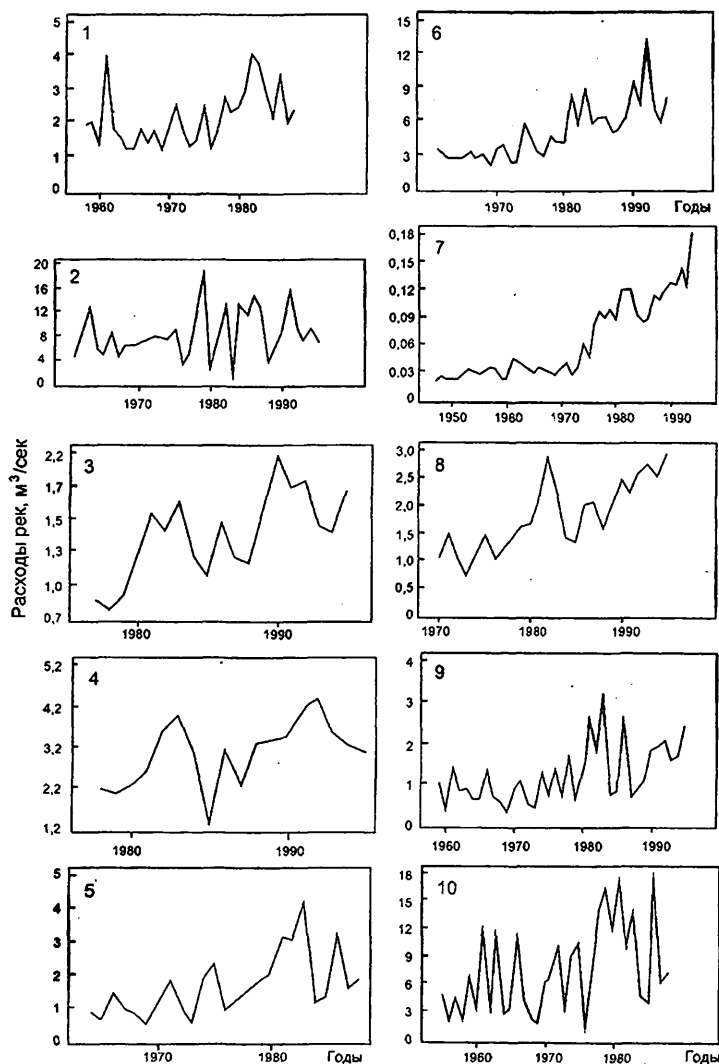
следует увязывать прежде всего с антропогенной деятельностью на водосборе

В том числе, даже на слабо хозяйственно освоенных водосборах градиенты трендов в 2–3 раза превышают те, которые могли бы быть определены климатическими изменениями при принятом среднегодовом коэффициенте подземного стока. Отсюда можно заключить: а) рассматриваемые водосборы не располагаются в абсолютно естественных условиях и б) коэффициент подземного стока растет с ростом степени водности года.

К факторам, нарушившим условия формирования подземных вод, можно отнести проведенную мелиорацию земель в регионе, появление значительного количества садовых участков с орошением, распашку земель, планировку территории при разного рода строительстве. Все это приняло региональный характер и несомненно изменило условия питания подземных вод. В этой связи режим подземных вод на таких территориях можно было бы назвать слабо нарушенным, так как несмотря на появление техногенных факторов основные сезонные и многолетние изменения в режиме подземных вод осуществляются под влиянием естественных факторов.

Сопоставляя степень освоенности территории водосборов, несколько условно можно было бы оценить их как со слабо нарушенным режимом при градиентах трендов менее  $0,05 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  в год и нарушенных – с градиентом трендов от  $0,05$  до  $0,2 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  в год (см. рис.6.14, рис.6.15).

В районах с сильно нарушенным водным балансом (водосборы рек Клязьма, Москва, Истра, Озерна, Нерская, Воря и др.) градиенты трендов возрастают до  $0,1\text{--}0,18 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  и составляют в среднем около  $0,15 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  в год. Меженные расходы таких рек за последние 20–30 лет возросли в 2–3 и более раз (рис.6.16), что нельзя не учитывать при планировании рационального использования подземных вод в условиях взаимосвязи поверхностных и подземных вод, когда речной сток рассматривается основным источником восполнения эксплуатируемых подземных вод. Вместе с тем, как уже отмечалось выше, такие изменения в меженных расходах рек не могут характеризовать соответствующий рост питания подземных вод и связаны главным образом с транзитным стоком, возросшим за счет попусков из водохранилищ, а также за счет утечек и сброса в подземные и поверхностные воды коммунальных стоков и возвратных вод, формируемых в результате эксплуатации глубоких водоносных горизонтов или водозаборов, расположенных как в пределах изучаемых, так и на других водосборах. Поэтому судить об изменении естественного питания подземных вод можно лишь по отмеченным выше



**Рис. 6.15.** Хронологические графики зимних меженных расходов рек с нарушенным режимом

1 - Шоша, Микулино-Городище; 2 - Москва, Можайск; 3 - Нара, Наро-Фоминск; 4 - Протва, Веря; 5 - Таруса, Похвистнево; 6 - Дубна, Вербилки; 7 - Закса, Большое Сареево; 8 - Северка, Покровское; 9 - Нерская, Куровское; 10 - Пра, Деулино

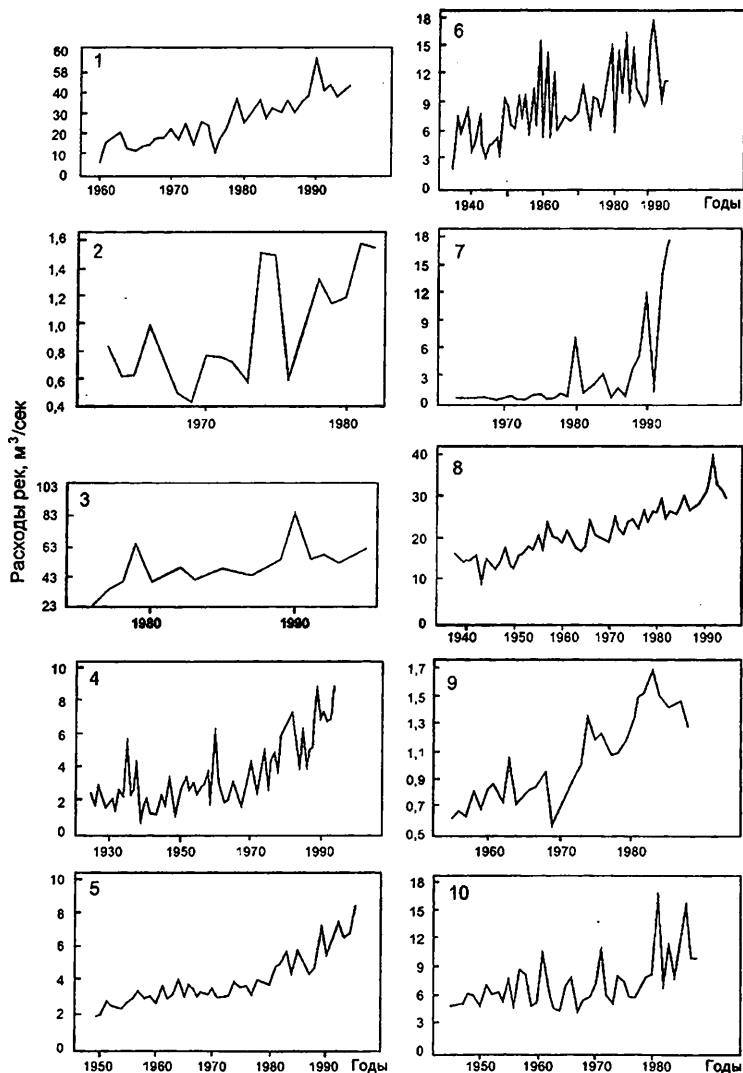


Рис. 6.16. Хронологические графики зимних межениных расходов рек с сильно нарушенным режимом

1 – Москва, Звенигород; 2 – Озерна, Городище; 3 – Москва, Петрово-Дальнее; 4 – Пахра, Макарово; 5 – Воря, Михнево; 6 – Истра, Павловская Слобода; 7 – Руза, Красное Село; 8 – Клязьма, Павловский Посад; 9 – Серая, Новинки; 10 – Нерль, Кибергино



статистически незначимым трендам. Строго говоря, такие тренды могут и не учитываться во многих расчетах и прогнозах, как мало достоверные и несущественные.

Однако, принимая во внимание наличие таких же трендов в атмосферных осадках и прогнозируемый климатологами дальнейший рост осадков в будущем, можно, как минимум, рассматривать существующее среднемноголетнее питание подземных вод как минимально гарантированное и в будущем, что повышает надежность прогнозных оценок, создавая им определенный «запас прочности». В прогнозных же оценках подобные тренды могут учитываться для получения приближенных представлений о возможных изменениях ресурсов подземных вод в будущем, т.е. о масштабах такого «запаса». При этом необходимо учитывать и изменчивость коэффициентов подземного стока, то есть увеличение доли осадков в питании подземных вод при изменении степени водности года.

Статистическая незначимость трендов слабо нарушенного, близкого к естественному подземного стока по многим водосборам области не создает теоретических противопоказаний для рассмотрения данного процесса как стационарного с применением соответствующего математического аппарата для прогнозов слабо нарушенного режима подземных вод, моделирования временных рядов и других видов их статистического анализа.

Для оценки степени стационарности рядов подземного стока и важности ее учета в расчетах по ряду водосборов с визуально четко выраженным и статистически значимым трендом были произведены расчеты основных статистических параметров как по искусственно разрезанным на три части отрезкам этих рядов, так и по полным рядам наблюдений (табл.6.3).

Как видно из результатов, расчетов среднемноголетние нормы стока во всех случаях, т.е. по всем отрезкам рядов, постоянно растут и довольно существенно (в 1,5–2 раза и более). Одновременно закономерно увеличивается дисперсия многолетних колебаний. Растут закономерно коэффициент асимметрии и соотношение  $C_s/C_v$ , хотя их значения и не играют практической роли при прогнозных оценках. В большинстве случаев растет и внутрирядная взаимосвязанность ( $R\tau$ ) членов ряда, хотя и не очень существенно. Градиенты трендов всех полных рядов статистически значимы без каких-либо элементов сомнений. Отрезки же рядов имеют статистически значимые тренды лишь в 50% случаев, а остальные относятся на грани значимости и незначимости.

Все это позволяет с уверенностью называть такие ряды нестационарными, что обязывает учитывать данный процесс в анализе и прогнозах.

Таблица № 6.3

**Зависимость основных статистических параметров рядов подземного стока  
Московской области от продолжительности наблюдений**

| Бассейн                 | Период,<br>годы | Основные статистические параметры |          |       |                        |       |
|-------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------|-------|------------------------|-------|
|                         |                 | $\bar{Q}$ , м <sup>3</sup> /сек   | $\sigma$ | $C_s$ | $C_v = \sigma/\bar{Q}$ | $R_t$ |
| р. Истра –              | 1935–1955       | 6,98                              | 2,13     | 2,56  | 0,30                   | -0,01 |
| с. Павловская           | 1955–1975       | 8,68                              | 2,87     | 2,95  | 0,33                   | -0,44 |
| Слобода                 | 1975–1995       | 12,61                             | 4,30     | 4,4   | 0,34                   | 0,067 |
| $F = 1950 \text{ км}^2$ | 1935–1995       | 9,43                              | 4,03     | 1,43  | 0,43                   | 0,30  |
| р. Москва –             | 1960–1972       | 15,92                             | 4,97     | 5,4   | 0,31                   | 0,16  |
| г. Звенигород           | 1972–1983       | 24,5                              | 7,89     | 7,5   | 0,32                   | 0,24  |
| $F = 5000 \text{ км}^2$ | 1983–1995       | 37,46                             | 7,69     | 7,9   | 0,21                   | 0,33  |
|                         | 1960–1995       | 25,93                             | 11,63    | 0,40  | 0,45                   | 0,70  |
| р. Нерская –            | 1959–1971       | 0,79                              | 0,34     | 0,41  | 0,43                   | -0,24 |
| г. Куровское            | 1971–1983       | 1,27                              | 0,80     | 0,9   | 0,63                   | 0,25  |
| $F = 612 \text{ км}^2$  | 1983–1995       | 1,88                              | 1,11     | 1,71  | 0,59                   | -0,07 |
|                         | 1955–1995       | 1,27                              | 0,89     | 1,48  | 0,70                   | 0,22  |
| р. Клязьма –            | 1937–1956       | 14,7                              | 2,41     | 3,1   | 0,16                   | 0,28  |
| г. Павловский           | 1956–1975       | 20,5                              | 3,0      | 3,7   | 0,15                   | 0,26  |
| Посад                   | 1975–1995       | 28,1                              | 4,7      | 5,4   | 0,17                   | 0,50  |
| $F = 4550 \text{ км}^2$ | 1937–1995       | 21,12                             | 6,59     | 0,67  | 0,31                   | 0,81  |

Установленные при этом закономерности изменчивости статистических параметров во времени могут служить основой для вариантных прогнозов при конструировании временных рядов подземного стока.

Наличие трендов в рядах подземного стока ставит вопрос о методике составления карт естественных ресурсов подземных вод, оцениваемых по минимальным годовым и меженным зимним расходам рек. Какой период предыстории необходимо учитывать для оценок модулей подземного стока в условиях нестационарности?

Для решения этого вопроса по ряду рек Подмосковья со слабо нарушенным режимом подземного стока были оценены соответствующие модули подземного стока за последние 10, 15 и 20 лет, а также за весь период наблюдений (табл. 6.4).

Как видно из таблицы, и меженные, и минимальные среднесесячные модули 95% обеспеченности в последние 10–15 лет существенно выше таковых за весь период наблюдений. В этой связи для того, чтобы карта в наибольшей мере отражала современные сложившиеся природно-техногенные условия на водосборе необходимо учитывать главным образом последние годы.

В целях исключения случайных годовых отклонений питания подземных вод от среднемультилетней нормы последних лет, оптимальным пе-

таблица 6.3 (окончание)

| Градиент тренда                        |                                          | Коэффициент корреляции тренда |                  |
|----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|------------------|
| $\Delta Q$ , м <sup>3</sup> /сек в год | $\Delta M$ , л/сек·км <sup>2</sup> в год | $r_{\text{факт}}$             | $r_{\text{нзм}}$ |
| 0,078                                  | 0,040                                    | 0,23                          | 0,43             |
| 0                                      | 0                                        | 0                             | 0,43             |
| 0,081                                  | 0,041                                    | 0,12                          | 0,43             |
| 0,13                                   | 0,067                                    | 0,57                          | 0,25             |
| 0,73                                   | 0,15                                     | 0,57                          | 0,55             |
| 1,23                                   | 0,25                                     | 0,56                          | 0,57             |
| 1,32                                   | 0,26                                     | 0,67                          | 0,55             |
| 0,97                                   | 0,19                                     | 0,87                          | 0,33             |
| -0,013                                 | -0,021                                   | -0,15                         | 0,55             |
| 0,15                                   | 0,24                                     | 0,72                          | 0,55             |
| 0,087                                  | 0,14                                     | 0,30                          | 0,55             |
| 0,047                                  | 0,077                                    | 0,57                          | 0,32             |
| 0,17                                   | 0,037                                    | 0,41                          | 0,44             |
| 0,22                                   | 0,048                                    | 0,43                          | 0,44             |
| 0,53                                   | 0,12                                     | 0,67                          | 0,44             |
| 0,34                                   | 0,075                                    | 0,89                          | 0,25             |

Таблица № 6.4

**Зависимость модулей зимней межени и минимальных годовых модулей от выбранного периода наблюдений**

| Река     | Период наблюдений (n лет) | $\bar{Q}$ , м <sup>3</sup> /сек, межень | $M$ , л/сек·км <sup>2</sup> межень | $\sigma$ , межень | $Q_{95\%}$ , Min | $M_{95\%}$ , Min |
|----------|---------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Медвенка | 1985–1995 (10)            | 0,080                                   | 3,7                                | 0,016             | 0,05             | 2,3              |
|          | 1980–1995 (15)            | 0,078                                   | 3,6                                | 0,015             | 0,04             | 1,9              |
|          | 1975–1995 (20)            | 0,067                                   | 3,1                                | 0,015             | 0,03             | 1,4              |
|          | весь период (31)          | 0,048                                   | 2,2                                | 0,020             | 0,02             | 0,9              |
| Лама     | 1985–1995 (10)            | 3,4                                     | 2,5                                | 1,20              | 1,3              | 1,0              |
|          | 1980–1995 (15)            | 3,5                                     | 2,7                                | 1,14              | 1,3              | 1,0              |
|          | 1975–1995 (20)            |                                         | 2,3                                | 1,15              | 1,1              | 0,8              |
|          | весь период (33)          |                                         | 1,8                                | 1,14              | 1,0              | 0,7              |

риодом наблюдений, по-видимому, должен быть период в 10–15 лет. Именно за такой период могут быть встречены и учтены практически все наиболее часто встречаемые в многолетних рядах природные циклы или группировки лет различной водности, т.е. 2–3 летние, 5–7 летние и 11–12 летние [26, 27]. Различия в модулях подземного стока, полученных за 10 и 15 лет, хотя и заметны, но не очень существенны.

Анализ трендов в уровнях грунтовых вод, наиболее четко реагирующих на изменения климатических условий, также отметил в рядах наблюдений продолжительностью от 20 до 60 лет наличие преимущественно (около 50%) тенденций к положительным трендам в различных частях Московской области (см. рис.6.13). Единичные отрицательные тренды связаны, по-видимому, с влиянием эксплуатации подземных вод, а также строительного дренажа. Во многих случаях каких-либо трендов вообще не установлено. Принимая во внимание, что более многочисленные положительные тренды или тенденции к ним согласуются с аналогичными трендами в подземном стоке и атмосферных осадках, можно предположить, что подобные тенденции закономерны и в целом свидетельствуют о существующей тенденции к некоторому увеличению питания подземных вод в регионе.

Вместе с тем, сопоставляя характеристики подземного стока Московского региона с соседними, можно заметить наличие аномалии с несколько повышенными значениями модулей подземного стока в этом районе (рис.6.17).

Подобную аномалию трудно объяснить какими-либо климатическими, орографическими или гидрогеологическими особенностями данной территории. Наиболее вероятной причиной этого факта может служить интенсивный водоотбор подземных вод из глубоких водоносных горизонтов, слабо взаимосвязанных с реками и сбросом возвратных вод в реки и грунтовые воды. При этом ущерб стоку, вызываемый отбором подземных вод, пока явно меньше объемов возвратных вод, это и приводит, с одной стороны, к созданию обширной воронки депрессии и даже осушению части водоносных горизонтов, а с другой – к увеличению поверхностного и подземного стока в намного больших размерах, чем это в состоянии были бы сделать изменения климата, таким образом интенсивная эксплуатация подземных вод переводит часть подземного стока замедленной глубокой циркуляции в зону более активного водообмена, что вызывает подъемы уровней грунтовых вод и увеличение поверхностного и подземного стока. Это явление отмечается даже в пределах интенсивно развивающейся воронки депрессии, где казалось бы поверхностный сток и грунтовые воды должны перехватываться и поглощаться. Так, например, в бассейне рек Медвенки и Закзы, несмотря на интенсивное снижение пьезометрических напоров в эксплуатируемом каменноугольном водоносном горизонте отмечается увеличение поверхностного стока и повышение уровней грунтовых вод (рис.6.18). Все это подтверждает вывод о превалировании роли возвратных вод над перехватом поверхностного стока несмотря на то, что перехват поверхностного стока и грунтовых

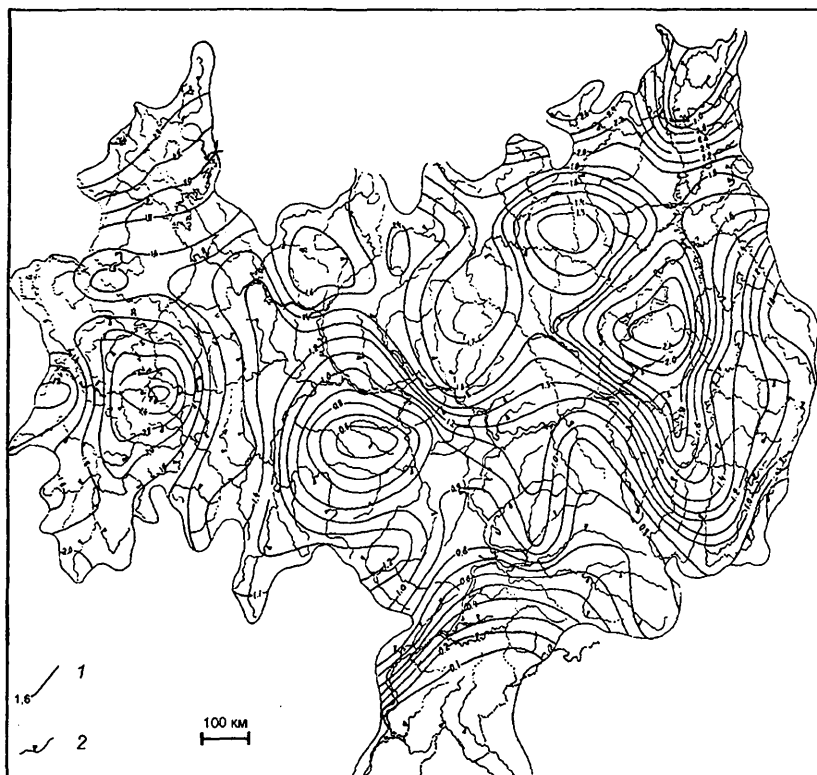


Рис. 6.17. Среднегодовое модули меженного подземного стока бассейна р. Волги  
1 – изолинии модулей, л/сек-км<sup>2</sup>; 2 – опорные гидрографы

вод возможно даже увеличивается. Однако зафиксировать это трудно из-за значительно большего вклада сбросных вод в структуру водного баланса речного стока над этим процессом.

Анализ вероятной цикличности в режиме уровней грунтовых вод производился тремя методами – спектральным, периодограммным и автокорреляционным.

Спектральный и периодограммный анализ выделил серию циклов, варьирующихся по периодам в довольно широких пределах (табл. 6.5).

Как видно из таблицы, по данным спектрального анализа в проанализированных рядах наиболее часто встречаются циклы с периодом

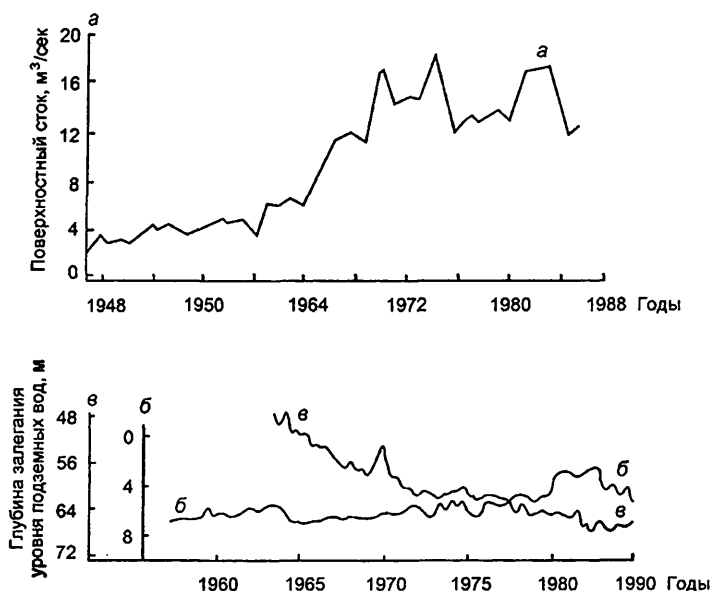


Рис. 6.18. Графики поверхностного стока р. Медвенки (а), уровней грунтовых (б) и напорных (в) подземных вод

Таблица № 6.5

**Вскрытые тенденции к цикличности в рядах уровней грунтовых вод по ряду скважин Подмосковья**

| №№ скв. | Наиболее значимые периоды циклов (в годах) по спектральному анализу | Глубина до воды, м | Наиболее значимые циклы по периодограммам |
|---------|---------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------|
| 48      | 5,3, 4,4                                                            | 1,4                | 40, 10,2                                  |
| 15/50   | 7,1, 5,3, 3,9, 3,3                                                  | 1,5                | 33,3                                      |
| 20      | 3,3, 2                                                              | 1,6                | 25, 8,3, 4,3                              |
| 21      | 5,5, 3,5                                                            | 1,6                | 21,4, 4,6                                 |
| 30      | 5,5, 3,8                                                            | 2                  | 50                                        |
| 19      | 5,3, 4,2, 3,5, 2                                                    | 3,2                | 50, 20                                    |
| 25      | 33,3, 5, 4, 3,3                                                     | 4,7                | 20                                        |
| 44      | 50, 14,3, 5,3                                                       | 11                 | 25, 14                                    |

5,3–5,5 и 3,3–3,5 лет. Отмечена тенденция к увеличению продолжительности циклов с глубиной залегания уровней грунтовых вод до 14,3, 33,3 и даже 50 лет, что связано с увеличением степени инерционности подземных вод (зарегулированностью их питания и разгрузки) с глубиной.

Периодограммный анализ в числе наиболее значимых циклов (по максимальным всплескам периодограмм) выделил преимущественно длиннопериодные тренды (см. табл.6.5). Среди них также довольно широкий спектр циклов (10, 14, 20, 25, 33, 50 лет).

Наименьший разброс вероятных периодов цикличности показал автокорреляционный анализ. Практически по всем скважинам отмечена близкая к статистически значимой цикличность с периодом 24–26 лет.

Автокорреляционный анализ рядов, составленных из среднемесячных значений по каждому месяцу в отдельности, за многолетие показал в целом идентичность автокорреляционных функций (рис.6.19). Это свиде-

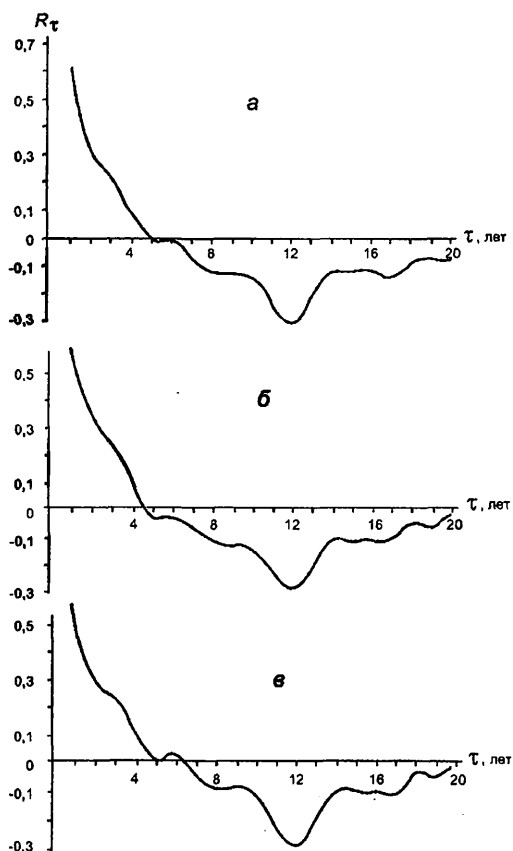


Рис. 6.19. Автокорреляционные функции среднемесячных значений января (а), февраля (б), марта (в) по скв. 19 (Щемилово)

тельствует об однородности цикличности внутригодовых изменений по сравнению с таковой, устанавливаемой по среднегодовым значениям уровней подземных вод. Данное обстоятельство подтверждает возможность прогнозных оценок внутригодового режима подземных вод с использованием расчетных графиков, аналогичных представленным на рисунке 3.4.

Приведенные в таблице 6.5 цифры показывают, что для региона не существует каких-то определенных и тем более статистически значимых закономерных циклических изменений в подземных водах. Более того, разными методами устанавливается различная цикличность. Вполне очевидно, что достоверность особенно длиннопериодной цикличности, соизмеримой с продолжительностью наблюдений, крайне не высока.

Аналогичные результаты были получены, как было сказано выше, и по другим регионам России [26, 27]. Все это свидетельствует об отсутствии четких циклических колебаний, как в питании, так и разгрузке подземных вод, которые можно использовать для прогнозов режима или планирования освоения подземных вод на детерминированной основе. Это видно и при анализе хронологических графиков режима уровней грунтовых вод с наиболее продолжительными периодами наблюдений (см. рис.6.13). Ни один из наблюдаемых на таких графиках циклов не повторяется ни по амплитудам, ни по периодам. Можно лишь отметить тенденции к некоторым длиннопериодным циклам или группировкам лет различной водности, осложненных более короткопериодными (2–3, 4–5 летними) и достаточно незакономерными колебаниями.

Вместе с тем, фиксируемые группировки серий маловодных и многоводных лет могут учитываться в виде стохастического процесса с оценками, как это было показано выше, вероятности соответствующих серий как по их продолжительности, так и глубинам «перебоев» или возникающих объемов дефицитов в воде в маловодные периоды.

Таким образом, при планировании рационального использования ресурсов подземных вод в регионе следует принимать во внимание как наличие многолетних трендов в режиме уровней и расходов подземных вод, особенно там, где они статистически значимы, так и закономерности чередований серий маловодных и многоводных периодов, в том числе как для отдельных маловодных лет, так и для маловодных периодов внутри года.

Одним из важных аспектов закономерностей многолетней изменчивости режима и ресурсов подземных вод является изучение региональной синхронности или асинхронности режима. Этот аспект важен как с точки зрения оценки возможности управления водоотбором в единой



системе водообеспечения региона, когда дефициты стока в одном регионе можно покрывать за счет другого, не содержащего дефицита в данный момент, так и для обоснования возможностей использования для анализа данных по постам с продолжительными периодами наблюдений в качестве аналогов для участков конкретных исследований с синхронным режимом, где представительных рядов наблюдений нет.

Для выявления степени синхронности и асинхронности режима подземного стока в пределах Московской области был выполнен кросскорреляционный анализ серии рядов наблюдений, расположенных на противоположных окраинах области в различных направлениях: с севера на юг, с запада на восток, с северо-востока на юго-запад и с северо-запада на юго-восток. Результаты этих расчетов можно проиллюстрировать таблицей 6.6.

Во всех случаях характер кросскорреляционной функции оказался идентичным. Максимальными и, как правило, статистически значимыми коэффициентами корреляции оказались коэффициенты при нулевом сдвиге. Лишь коэффициент корреляции подземного стока водосборов р. Москва – д. Барсуки и р. Нерская – г. Куровское оказался значимым при сдвиге, равным году. В остальных случаях при таком сдвиге коэффициенты кросскорреляции были статистически незначимыми.

Таблица № 6.6

Степень взаимосвязи рядов подземного стока различных частей Московской области

| Коррелируемые водосборы (река, пост)        | Направление оси устанавливаемой взаимосвязи | Коэффициент кросскорреляции |                  |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|------------------|
|                                             |                                             | при $R_{\tau=0}$            | при $R_{\tau=1}$ |
| Нерль (Подол) – Осстр (Маркино)             | С–Ю                                         | 0,64                        | 0,23             |
| Протва (Верей) – Пра (Деулино)              | З–В                                         | 0,66                        | 0,17             |
| Москва (Барсуки) – Нерская (Куровское)      | З–В                                         | 0,12                        | 0,84             |
| Дубна (Вербилки) – Осстр(Хрусьовка)         | С–Ю                                         | 0,44                        | -0,11            |
| Нара (Папино) – Киржач (Барскова)           | ЮЗ–СВ                                       | 0,65                        | 0,31             |
| Лама (Егорье) – Осстр (Маркино)             | СЗ–ЮВ                                       | 0,80                        | 0,41             |
| Шоша (Микулино Городище) – Осстр (Маркино)  | СЗ–ЮВ                                       | 0,65                        | 0,31             |
| Протва (Верей) – Клязьма (Павловский Посад) | ЮЗ–СВ                                       | 0,57                        | 0,35             |

Выполненный анализ показал, что режим подземных вод в пределах всей Московской области можно считать практически синхронным. Это позволяет коррелировать ряды уровней подземных вод и подземного стока при расчленении гидрографов даже в тех случаях, когда наблюдательная скважина не располагается в пределах данного водосбора.

Одновременно этот вывод не позволяет рассчитывать на управление водоотбором за счет перераспределения во времени нагрузок на водозаборы, расположенные в различных частях области, с учетом региональной асинхронности восполнения запасов подземных вод. Некоторые предпосылки к этому имеются лишь для крайних западных и восточных частей области.

Важной для выбора модели прогноза и моделирования режима подземных вод является оценка внутрирядной взаимосвязанности членов рядов уровней и расходов подземных вод.

Степень внутрирядной взаимосвязанности меженных годовых расходов подземного стока изменяется чаще всего (при  $R_{\tau=1}$ ) в пределах 0,3–0,5 (см. табл. 6.3). Это значительно выше средних годовых значений коэффициента автокорреляции поверхностного стока, оцениваемого обычно в среднем около 0,2. Все это еще раз подтверждает, что меженные зимние расходы поверхностных вод определяются более зарегулированными подземными водами. При сдвиге в два года коэффициенты автокорреляции уменьшаются чаще всего в двое, что позволяет отдавать предпочтение простым цепям Маркова для прогнозов и моделирования рядов подземного стока.

Степень внутрирядной связанности среднегодовых значений уровней подземных вод не редко бывает еще выше, чем подземного стока и может достигать 0,5–0,6. Однако чаще взаимосвязанность уровней и расходов подземных вод бывает идентичной. Вместе с тем уменьшение коэффициентов автокорреляции при увеличении временных сдвигов для уровней подземных вод чаще всего менее резкое, чем для подземного стока. В итоге статистически значимые коэффициенты корреляции (превышения значений автокорреляционной функции над доверительным интервалом), могут встречаться при сдвигах до 2–3 лет (см. рис. 6.19). Для анализа и прогнозов таких рядов могут использоваться уже сложные цепи Маркова.

Анализ законов распределения уровней подземных вод и подземного стока показал возможное появление пяти различных типов кривых [25, 28]:

1. Эмпирические точки располагаются на вероятностной бумаге (клетчатка Хозена) по прямой или близко к прямой линии, что свидетельствует о нормальном законе распределения.

2. Эмпирические точки располагаются по вогнутой кривой, спрямляемой на логарифмической вероятностной бумаге, что свидетельствует о логарифмически нормальном законе распределения

3. Эмпирические точки располагаются на вероятностной бумаге в виде выпуклой (вверх) кривой, т.е. имеют правоасимметричное распределение.

4. Эмпирические точки располагаются в виде вогнутой кривой, характерной для левоасимметричного распределения, хорошо аппроксимируемого кривыми Пирсона III типа и трехпараметрическим гамма-распределением С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [39] и, наконец,

5. Сложное вогнуто-выпуклое распределение кривых с выполаживанием концов кривой обеспеченности.

Наиболее часто (свыше 50%) встречается левоасимметричное распределение. Выполаживание эмпирических кривых в области наиболее высоких положений уровней грунтовых вод и больших значений расходов подземных вод связано с ролью верхней границы потока подземных вод, т.е. с увеличением испарения с поверхности грунтовых вод при подъеме их уровней, а также с увеличением оттока подземных вод в дренажи с ростом мощности потока. Выполаживание эмпирических кривых графика обеспеченности в области низких положений уровней грунтовых вод и малых расходов подземного стока связывается с влиянием отметок дренажей, сдерживающих дальнейшее снижение уровней и расходов подземных вод. В качестве таких дренажей или области разгрузки подземных вод могут служить реки, водоемы, болота, родники, тыловые швы террас с мочажинами и др.

Как показал опыт, в большинстве случаев для построения теоретических графиков обеспеченности уровней и расходов подземных вод могут использоваться таблицы С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [39].

Резюмируя все вышеизложенное, можно заключить, что многолетняя изменчивость режима уровней подземных вод и подземного стока в Московском регионе определяется во многом как еще природными, так и в значительной мере уже техногенными факторами. Роль последних наиболее четко проявляется в увеличивающемся подземном стоке и межениных расходах рек, используемых для оценок естественных ресурсов подземных вод. В результате, если для анализа и прогнозов режима уровней грунтовых вод и подземного стока по части водосборов пока можно рассматривать многолетнюю их изменчивость как стационарный процесс (с постоянной среднемноголетней нормой, дисперсией и автокорреляционной функцией), то для многих водосборов характеристики подземного стока свидетельствуют уже о явной нестационарности режима. В этих

случаях для анализа и прогнозов режима подземного стока необходим учет часто значительных трендовых составляющих, изменчивости статистических параметров во времени, роли техногенной компоненты в водном балансе. Вышеизложенные закономерности формирования режима уровней подземных вод и подземного стока позволяют, в частности, обосновать выбор той или иной модели прогноза режима, необходимых для прогноза статистических параметров анализируемых рядов наблюдений, а также законов распределения уровней или расходов подземных вод.

Вместе с тем, к анализу фиксируемого в реках подземного стока необходимо подходить с особой осторожностью. С одной стороны, он может отражать сложившуюся природно-техногенную обстановку на водосборе и поэтому может характеризовать как естественные, так и потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод, формирующиеся на водосборе. С другой же стороны, фиксируемый в реках сток может суммировать не только формирующиеся на водосборе водные ресурсы, но и ресурсы, поступившие на водосбор из других бассейнов, в том числе за счет эксплуатации глубоких водоносных горизонтов, перебросок стока из других водосборов. Значительная часть из этих составляющих водного баланса может сбрасываться прямо в реку, минуя водоносный горизонт, то есть не участвовать в питании последнего. В этом случае, полученные по таким гидрологическим замерам модули и коэффициенты подземного стока могут оказаться существенно завышенными по сравнению с природными и не могут использоваться для характеристики условий питания подземных вод и их естественных ресурсов.

О степени нарушенности подземного стока, как было показано выше, можно судить по градиентам трендов. В том числе к слабо нарушенному, практически естественному подземному стоку можно отнести водосборы с градиентом тренда менее  $0,05 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  в год, к нарушенному режиму – от  $0,05$  до  $0,1 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  в год и к сильно нарушенному режиму – выше  $0,1 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  в год. Анализ техногенной обстановке показывает, что несмотря на условность этого разделения, порядок цифр можно считать достаточно показательным.

Время наступления существенных изменений в стоке хорошо улавливается по отклонениям от прямой на двойных интегральных графиках связей отдельных анализируемых водосборов с заведомо естественным или практически естественным режимом подземных вод на водосборе.

Принимая во внимание повсеместное наличие положительных трендов в подземном стоке, для характеристики сложившихся на сегодня природно-техногенных условий формирования подземных вод и тем более для прогнозов целесообразно учитывать данные наблюдений последних

10–15 лет. Использование всего ряда наблюдений приведет к существенному занижению среднееголетних и особенно минимальных величин подземного стока, т.к. они будут характеризовать в основном условия формирования стока в прошлом, возврат к которому, по крайней мере в ближайшей перспективе, принимая во внимание климатологические прогнозы, маловероятен.

Установленная синхронность многолетнего режима подземных вод в пределах Московской области позволяет использовать для расчленения гидрографов рек данные о режиме уровней грунтовых вод, не обязательно расположенные непосредственно в пределах анализируемого водосбора, что облегчает решение проблемы в условиях недостаточности исходной информации.

Вскрытые характеристики степени внутрирядной взаимосвязанности, а также законов распределения характеристик гидродинамического режима подземных вод дают возможность обосновать исходные параметры для моделирования прогнозных рядов уровней и расходов подземных вод. Все это в целом позволяет обосновать как методические и практические приемы анализа и прогнозов режима подземных вод, так и выбрать требуемые представительные исходные данные для определения естественных ресурсов подземных вод и прогнозов их возможной изменчивости в будущем.

---

---

## *Глава 7*

# **РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МОСКОВСКОГО РЕГИОНА**

Как известно, наибольшую практическую значимость из гидрогеологических данных представляют естественные ресурсы подземных вод, определяющие пределы и перспективы неограниченного во времени водопотребления, а также потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод, определяющие пределы возможного использования естественных ресурсов поверхностных и подземных вод без недопустимых экологических последствий и нарушений окружающей среды. Именно поэтому важно рассмотреть эти два аспекта проблемы.

### **7.1. Естественные ресурсы подземных вод региона**

#### **7.1.1. Основные понятия и определения**

Под естественными ресурсами понимается обеспеченный питанием расход потока или просто питание подземных вод.

Следует отметить, что в отечественной гидрогеологической науке существует довольно много определений понятия «естественные ресурсы». Вместе с тем, если не рассматривать различия в словосочетаниях, то все эти формулировки отличаются в основном тем, что одни авторы рассматривают естественные ресурсы как питание подземных вод, а другие – как расход потока подземных вод, поступающих в области их разгрузки. Различий по существу между этими подходами нет, так как имеющий место расход потока подземных вод или подземный сток определяются питанием. Принципиальное значение здесь имеет вопрос, как легче и достовернее можно определить естественные ресурсы через питание или подземный сток. Определить питание подземных вод в региональном

плане практически невозможно. В зависимости от глубин залегания грунтовых вод и строения зоны аэрации питание изменяется в широких пределах и рассредоточено во времени. Во многих случаях (при суглинистом строении зоны аэрации и широком развитии верховодки) оно осуществляется круглогодично. В водоносном горизонте осуществляется перераспределение напоров между участками с более и менее интенсивным питанием. В результате подъёмы уровней подземных вод могут наблюдаться и тогда, когда питание на данном участке еще и не началось. Все это затрудняет оценку питания подземных вод водосбора в целом.

Определить естественные ресурсы подземных вод как подземный сток тоже не всегда просто, но все-таки можно. В тех случаях, когда река является единственной областью разгрузки подземных вод, подземный сток эквивалентен подземному питанию рек. В тех случаях, когда помимо реки имеются еще промежуточные области разгрузки подземных вод (старичные озера, заболоченности в тыловых швах террас, неглубокое залегание грунтовых вод в поймах рек) значительная часть подземного стока может расходоваться на испарение и, поэтому, подземное питание рек может быть намного меньше подземного стока. Лишь в зимнее время, когда испарение отсутствует, естественные ресурсы подземных вод соответствуют подземному питанию рек и собственно питанию подземных вод.

Именно этот ключевой временной отрезок естественных ресурсов в сочетании с данными о режиме уровней подземных вод в области питания позволяют рассчитать сезонные вариации естественных ресурсов подземных вод и определить в итоге их среднегодовое значение для водосбора в целом.

Выбор методов определения естественных ресурсов подземных вод в значительной мере зависит от степени детальности проводимых исследований или от степени гидрогеологической изученности территории, способной обеспечить необходимую достоверность экстраполяции полученных результатов тех или иных расчетов с изученных участков на не изученные для получения требуемых региональных оценок естественных ресурсов подземных вод. При этом необходимо иметь в виду, что высокая фильтрационная неоднородность геологической среды, а также особенности рельефа, определяющие разнообразие глубин залегания грунтовых вод и, соответственно, неравномерность распределения питания подземных вод по площади, приводят к тому, что не редко ошибки экстраполяции полученных оценок питания подземных вод с детально изученного участка на какую-то территорию могут превосходить его реальную величину.

На детально изученных территориях, (например, на участках строительных площадок, разведываемых водозаборов и т.п.) величины питания подземных вод могут с успехом быть определены на основе гидродинамических расчетов по Дюпюи, по Г.Н. Каменскому в конечных разностях, по уравнениям Г.Н. Каменского и И.К. Гавич для междуречного массива и др. [3, 11, 14, 28]. На отдельных ключевых воднобалансовых участках питание оценивается по данным наблюдений за режимом уровней подземных вод, по амплитудам сезонных колебаний уровней [28], по лизиметрическим наблюдениям [42], по наблюдениям за динамикой влаги в зоне аэрации [47, 71, 72], по гидрохимическим, изотопным и другим индикаторным исследованиям [74]. Имеющиеся на таких участках данные о распределении в пространстве расчетных гидрогеологических параметров и о площадях с различными глубинами залегания подземных вод, а также наблюдения за режимом подземных вод, даже не очень большой продолжительности, позволяют сравнительно обоснованно и достоверно не только экстраполировать полученные оценки питания подземных вод на площадь изученной территории, но и получить по ним достаточно реальные представления о возможной многолетней изменчивости питания подземных вод, используя детальные гидрогеологические карты, разрезы, различные известные процедуры наращивания рядов или способы получения необходимых вероятностных оценок многолетних характеристик режима уровней или расходов подземных вод по статистическим параметрам рядов [28].

В связи с тем, что для решения многих вопросов, связанных с обоснованием гарантированности устойчивой эксплуатации и восполнения запасов подземных вод, требуются обычно представления о среднемноголетнем питании или минимальном среднемесечном питании заданной обеспеченности, то такие данные в региональном плане могут быть получены, как правило, лишь по одиночным наблюдательным скважинам опорной наблюдательной сети и оценены по коэффициентам инфильтрационного питания. Однако и таких скважин, равномерно распределенных по всем гидрогеологическим районам, либо мало, либо по многим районам вообще нет. Створы же скважин, расположенные по потоку с многолетними наблюдениями за режимом подземных вод, вообще крайне редки, что практически исключает применение гидродинамических расчетов для этих целей.

Существенная зависимость величин питания подземных вод от глубины их залегания, фильтрационных свойств пород зоны аэрации ( $k/\mu$ ), а также от характера рельефа, во всех случаях затрудняет экстраполяцию многолетних характеристик режима подземных вод, полученных



по отдельным наблюдательным скважинам, на какую-то площадь и тем более на водосбор в целом. Точность определения всех воднобалансовых составляющих (осадков, испарения, подземного питания рек) крайне низка, что не позволяет использовать данный подход даже для масштабных оценок естественных ресурсов подземных вод. Поэтому единственно возможным способом получения реальных представлений о многолетней изменчивости питания или естественных ресурсах подземных вод в региональном плане может стать лишь анализ разгрузки подземных вод, т.е. данные по подземному стоку. Методология оценок и картирования подземного стока рассматривалась неоднократно многочисленными исследователями [28, 40, 43, 51, 74]. Поэтому здесь следует остановиться главным образом на принципиальных особенностях таких оценок, их достоверности и области применимости.

Как известно [74, 75], фиксируемый в реках подземный сток в среднегодовом разрезе, как правило, меньше естественного питания подземных вод, т.к. какая-то часть последнего расходуется на испарение и транспирацию в промежуточных областях разгрузки, то есть в поймах, тыловых швах террас, различных микропонижениях рельефа, а также используется для водоснабжения на водосборе. В результате подземный сток характеризует результирующее питание на водосборе в целом. Однако практический интерес не редко представляют именно такие реально располагаемые естественные ресурсы, сформировавшиеся в конкретных природно-техногенных условиях, на которые можно рассчитывать при проектировании дополнительного водоснабжения и которые можно перехватить в долинах рек, где обычно закладываются централизованные водозаборы. При этом сформировавшаяся за счет разности питания и эвапотранспирации разгрузка подземных вод в реки с конкретного водосбора может быть определена непосредственно гидрологическими замерами, т.е. без условных гидрогеологических расчетов и экстраполяций и связанных с ними субъективных неопределенностей. Фиксируемый гидрологическими измерениями меженный зимний или минимальный среднемесячный речной сток могут быть использованы для наиболее достоверных оценок минимальных обеспеченных в многолетнем разрезе величин естественных ресурсов, определяющих, в конечном итоге, эксплуатационные запасы подземных вод.

Именно зимние расходы рек определяются только разгрузкой подземных вод, не осложненной эвапотранспирацией или хозяйственным разбором стока в вегетационный период. Именно только по многолетним рядам, составленным из зимних меженных расходов рек, замыкающих водный баланс водосбора за гидрологический год, можно с наиболь-

шей достоверностью судить о многолетней изменчивости естественных ресурсов подземных вод.

Среднегодовые значения подземного стока, не измеряемые непосредственно, а основанные часто на субъективном расчленении гидрографа рек, не обладают аналогичной высокой достоверностью, прежде всего из-за условности используемых для этого способов расчетов. Тем не менее, полученный с использованием гидрологических данных среднегодовой подземный сток вполне может быть использован для приближенного определения предельных гарантированных среднегодовых величин естественных ресурсов подземных вод. Прежде всего, такие ресурсы могут приниматься во внимание при расчетах эксплуатационных запасов подземных вод по водоносным горизонтам, обладающим затрудненной гидравлической взаимосвязью поверхностных и подземных вод. Такие водоносные горизонты могут рассматриваться как водохранилища с многолетним регулированием, в которых при значительных объемах воды и обширных воронках депрессии может перехватываться и аккумулироваться среднесуточное питание подземных вод.

Гарантированность величин таких оценок в определенных условиях создается потенциальной возможностью некоторого увеличения этих ресурсов в процессе эксплуатации подземных вод за счет снижения или даже снятия испарения при искусственном понижении уровней грунтовых вод, то есть использованием привлекаемых возобновляемых ресурсов подземных вод. При этом следует иметь в виду, что такое дополнительное питание далеко не будет эквивалентным снимаемому испарению, так как при снижении уровней грунтовых вод величина инфильтрации также уменьшится. Так например, как было показано выше, при глубине залегания уровня грунтовых вод около 1 м инфильтрация может достигать 22–25% от нормы атмосферных осадков. Однако результирующее питание подземных вод (за вычетом испарения) составляет при этом всего 2–3% от осадков. При снижении уровней грунтовых вод до 3 м коэффициент инфильтрации снижается с 22–25% до 12–13%. Результирующее питание при этом возрастает лишь до 8% от осадков. Существенность такого увеличения питания подземных вод для водосбора в целом зависит от соотношения в нем площадей с глубинами до воды менее и более 2–3 м.

Принимая во внимание трудность достоверного установления этого различия при региональных исследованиях, нами под естественными ресурсами подземных вод понимается результирующее питание подземных вод эквивалентное их разгрузке, оцениваемое по подземному стоку реки.

Важным также является и то, что гидрологические наблюдения в отличие от большей части наблюдений за режимом подземных вод ведутся нередко в течение довольно продолжительных периодов, а также более равномерно распределены в пространстве. Это создает определенную основу для получения достаточно надежных представлений о многолетней изменчивости естественных ресурсов подземных вод, как усредненных для отдельных водосборов в целом, так и в региональном плане.

Преимуществом определения естественных ресурсов подземных вод по подземному стоку, дренируемому реками, является и то, что в нем как бы автоматически учитывается разнонаправленная взаимосвязь грунтовых и межпластовых водоносных горизонтов. Питание последних за счет первых на междуречьях и наоборот – подпитывание первых за счет последних в долинах рек трудно точно учесть и в гидродинамических гидрогеологических расчетах и при анализе данных режима подземных вод, что в определенной мере затрудняет объективную количественную оценку их сезонного питания.

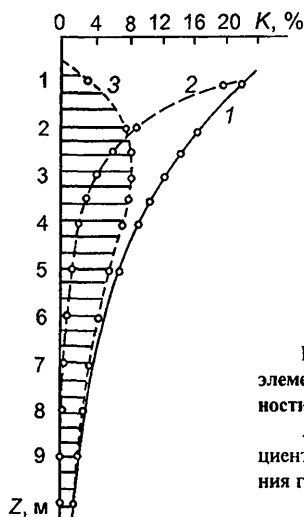
Преимуществом оценок ресурсов подземных вод по подземному стоку является также и то, что в нем интегрально учитывается разгрузка всех водоносных горизонтов, дренируемых рекой. При этом не важен даже трудно определяемый вклад каждого из таких горизонтов в общую сумму дренируемых рекой подземных вод, т.к. заложив водозабор на наиболее продуктивный из них можно перехватить не только подземный сток из всех этих горизонтов, но и при необходимости и допустимую часть транзитного стока.

Вместе с тем, учитывая дискуссионность и существующие разночтения в понятиях и соотношениях подземного стока и естественных ресурсов подземных вод, на этом вопросе следовало бы остановиться более подробно. При этом следует сказать, что этот вопрос не только понятийный или терминологический, но и в большей мере принципиальный, определяющий и методику определения этих гидрогеологических характеристик и условия их обоснованного практического использования. Исходя из сформулированного выше понятия естественных ресурсов как обеспеченного питанием расхода подземных вод, естественные ресурсы эквивалентны подземному стоку, т.е. отток определен притоком или сток питанием. Проблема заключается в том, как и где их определить. Разночтения возникают при смешении понятий «питание подземных вод» и «инфильтрация» и особенно, если последняя называется «инфильтрационное питание». Чаще всего подобное смешение понятий возникает либо при стремлении обосновать возможное увеличение естественных ресурсов подземных вод за счет снятия испарения, как бы получая в итоге ис-

тинное естественное питание, не расходуемое на испарение, либо при определении реального естественного питания подземных вод для калибровки математических моделей.

Напомним, что в работах по режиму и балансу подземных вод обычно определяют: а) инфильтрацию, т.е. то количество атмосферной влаги, которое достигает уровня грунтовых вод, б) испарение, т.е. ту часть инфильтрации, которая безвозвратно расходуется, и в) собственно питание подземных вод, т.е. результирующую разность инфильтрации и испарения. Именно это реальное естественное результирующее питание подземных вод определяет и распределение уровней и напоров, а также подземный сток с водосбора. Поэтому именно только эту составляющую баланса следует использовать при калибровке математических моделей.

Понижение уровней грунтовых вод нарушает соотношение всех составляющих водного баланса – инфильтрация и испарение сокращаются, а результирующее питание до определенного момента растёт. На рисунке 7.1 приведен график зависимости этих элементов баланса от глубины, составленный А.В. Лебедевым для Подмоскovie на основе гидродинамических расчетов по режиму уровней грунтовых вод и экспериментальных исследований в лизиметрах. Как видно из рисунка, снижение уровней грунтовых вод с 1 до 3–4 м приведет к сокращению инфильтрационного питания с 22–24% до 10–12% от нормы атмосферных осадков,



**Рис. 7.1.** Зависимость усредненных коэффициентов элементов баланса грунтовых вод Подмоскovie от мощности зоны аэрации

1 – коэффициент инфильтрации осадков; 2 – коэффициент испарения грунтовых вод; 3 – коэффициент питания грунтовых вод или восполнения подземного стока

т.е. перехватить полностью инфильтрацию, имевшую место при малых глубинах до воды, невозможно, т.к. испарение из зоны аэрации сохранится. Результирующее же питание при этом, хотя и в пределах точности оценок осадков, но все-таки возрастет с 2 до 8% от осадков, оставаясь все еще меньше инфильтрации. Однако это существенное искусственно созданное увеличение реального питания подземных вод, оцененное на междуречьях, т.е. в областях питания, ничего общего с естественными ресурсами не имеет. Такое дополнительное питание относится к типичным привлекаемым ресурсам, возникающим при эксплуатации подземных вод, таким как перехват части поверхностного стока или стока соседних водосборов. Использование значений такого искусственно возросшего питания для калибровки моделей или для характеристики естественных ресурсов подземных вод недопустимо, поскольку приведет к неизбежному завышению и расчетных гидрогеологических параметров, и величин подземного стока.

В тоже время снижение уровней грунтовых вод на поймах рек или в тыловых швах низких террас действительно увеличивает результирующее питание подземных вод, но в областях их промежуточной разгрузки и соответственно естественных ресурсов, и только в пределах часто довольно локальных площадей промежуточной разгрузки. В основном же эта мера позволяет главным образом более полно перехватить реальные естественные ресурсы подземных вод, сформировавшиеся на обширных водораздельных площадях питания и разгружающихся за счет испарения в промежуточных областях разгрузки.

В данном случае снятое испарение в промежуточных областях разгрузки не дает в целом увеличения естественных ресурсов подземных вод, а позволяет лишь более полно их перехватить.

Более того целесообразность снятия испарения и получения за счет этого некоторого увеличения восполняемых привлекаемых и частично естественных ресурсов подземных вод следует еще доказать. Объясняется это тем, что сокращается в этом случае не столько как бы бесполезное или не продуктивное испарение, а наоборот, в большей мере влага, расходуемая на эвапотранспирацию, что может привести к негативным экологическим последствиям.

Вместе с тем именно на величину испарения грунтовых вод в промежуточных областях разгрузки естественные ресурсы подземных вод отличаются от подземного стока в реки, т.е. от подземного питания рек. Определить эту разность можно, зная площади промежуточных областей разгрузки, глубины залегания уровней грунтовых вод в них и литологический состав строения зоны аэрации. Количественно оценить эту

разность при региональных исследованиях прямым путем, т.е. по балансу, довольно сложно из-за отсутствия достаточной информации.

Следует также подчеркнуть, что на участках долин, где отсутствуют промежуточные области разгрузки, естественные ресурсы подземных вод или подземный сток эквивалентны подземному питанию рек. Там же, где промежуточные области разгрузки имеют место, естественные ресурсы могут значительно, особенно в аридных областях, превышать подземный сток в реки. Вызванное меандрированием реки чередование участков с наличием и отсутствием промежуточных областей разгрузки подземных вод делает невозможным определение среднегодовых значений подземного стока (естественных ресурсов) водосбора в целом на основе расчленения гидрографа рек, базируясь на данных единичных гидрографов.

Однако в зимний период, когда зона аэрации проморожена и испарение с поверхности грунтовых вод практически отсутствует, меженный речной сток полностью соответствует меженному подземному стоку, естественным ресурсам и подземному питанию рек в это время. В остальную часть года гидрограф рек слабо коррелирует с естественными ресурсами подземных вод. В паводок склоновый сток постоянно значительно (нередко в десятки раз) превалирует над естественными ресурсами подземных вод. В межень соотношение речного стока и естественных ресурсов подземных вод может быть различным. Последние могут быть меньше, равны или больше речного стока. При этом изменения с различным соотношением речного и поверхностного стока могут происходить в течение года несколько раз. Количественно оценить можно, установив по периоду зимней межени зависимость между уровнями грунтовых вод на междуречье и расходом подземного стока в реку с последующим расчетом изменений подземного стока в остальную часть года. Примеры таких оценок приведены ниже. Береговое регулирование стока, даже когда оно и имеет место, не вносит при данном способе расчетов каких-либо искажений в характер внутригодовой изменчивости естественных ресурсов подземных вод, соответствующей только режиму уровней подземных вод.

Полученный таким способом гидрограф подземного стока может уже использоваться для расчета достаточно достоверных среднегодовых значений расходов и модулей подземного стока, а также коэффициентов подземного стока.

Несмотря на определенную грубость подобных оценок на сегодня такой подход представляется наиболее перспективным для расчетов естественных ресурсов подземных вод при региональных исследованиях.

Подземное питание рек в своем максимуме может быть приближенно определено по гидрографу подземного стока в той его части, которая располагается в разрезе года ниже гидрографа речного стока или совпадает с ним. Эта приближенность определяется расчетным характером гидрографа подземного стока, не учитывающим испарение в промежуточной области разгрузки. Очевидным превышение подземного стока естественных ресурсов над подземным питанием рек становится при расположении гидрографа подземного стока над гидрографом реки.

Все вышеизложенное предопределило использование гидрологической информации для оценки естественных ресурсов подземных вод Подмосковья.

### **7.1.2. Изученность ресурсов подземных вод Московского региона**

Естественные ресурсы подземных вод Московского региона осуществлялись неоднократно при составлении мелкомасштабных карт подземного стока как по СССР в целом, так и наиболее детальной из них карты подземного стока Центральной и Восточной Европы в масштабе 1:1500000. Вместе с тем, наиболее обстоятельной с использованием практически всей гидрологической информации по району можно назвать работу Н.А. Лебедевой [43]. Однако на момент завершения этой работы (шестидесятые годы) использованные автором гидрологические ряды наблюдений по Московской области были крайне непредставительными (часто короткими и прерывистыми). Продолжительность рядов непрерывных наблюдений редко превышала 10 лет. Многие из них заканчивались в 1952–55 гг.

Результаты этих исследований тем не менее представляют определенный интерес как для получения общих представлений о масштабах подземного питания рек в регионе на тот момент при меньшей хозяйственной освоенности региона, так и главным образом для анализа закономерностей многолетней изменчивости подземного стока на основе сравнения с новыми оценками. В этой связи целесообразно представить основные результаты этой работы в таблице 7.1.

Изучение подземного стока Московского региона были осуществлены также В.С. Устюжаниным в 1972 и 1974 гг. [64, 65], который, используя двойные интегральные графики, впервые оценил по некоторым рядам региона степень техногенного воздействия водоотбора на подзем-

Характеристика подземного стока Московской области по Н.А. Лебедевой [43]

| №№<br>п/п | Река<br>и пост                           | Площадь<br>водосбора,<br>км² | Период<br>наблюдений,<br>годы              | Число лет<br>наблюдений | Модули по:<br>стока, л/с |     |
|-----------|------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----|
|           |                                          |                              |                                            |                         | средний                  | мл  |
| 1         | р. Шоша, Кобыково                        | 108                          | 1946, 1947                                 | 2                       |                          | 1,2 |
| 2         | р. Шоша,<br>Хлопово-Городище             | 339                          | 1949-1956                                  | 8                       |                          | 1,2 |
| 3         | р. Сестра,<br>Подмонастырская<br>Слобода | 2680                         | 1918, 1919, 1924-1929                      | 8                       |                          | 3,5 |
| 4         | р. Ока, г. Кашира                        | 68700                        | 1936-1940, 1942-1954                       | 18                      |                          | 2,2 |
| 5         | р. Протва, Спас-Загорье                  | 3540                         | 1938-1940, 1942-1954                       | 16                      |                          | 1,8 |
| 6         | р. Москва,<br>Макарово                   | 1420                         | 1929-1932, 1934-1940,<br>1943, 1945-1953   | 21                      |                          | 1,9 |
| 7         | р. Москва,<br>Звенигород                 | 5000                         | 1924-1932, 1934-1940,<br>1942-1953         | 28                      |                          | 2,2 |
| 8         | р. Москва,<br>Павшино                    | 7550                         | 1920, 1921, 1924-1929,<br>1932, 1934, 1935 | 11                      |                          | 1,6 |
| 9         | р. Руза,<br>Покров                       | 1140                         | 1931, 1932, 1934, 1935,<br>1949-1954       | 10                      |                          | 1,4 |
| 10        | р. Руза, г. Руза                         | 1930                         | 1943-1945, 1946-1952                       | 26                      |                          | 1,9 |
| 11        | р. Озерна,<br>Карповка                   | 502                          | 1938, 1940, 1943-1948,<br>1950-1954        | 13                      |                          | 2,2 |



таблица 7.1

| №№<br>п/п | Река<br>и пост                     | Площадь<br>водосбора,<br>км <sup>2</sup> | Период<br>наблюдений,<br>годы                         | Число лет<br>наблюдений | Модули подзем<br>л/сек-к |      |
|-----------|------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|------|
|           |                                    |                                          |                                                       |                         | средний                  | ми   |
| 12        | р. Истра, Бужарово                 | 1010                                     | 1925-1929, 1931-1934                                  | 9                       |                          | 1,8  |
| 13        | р. Истра,<br>Павловская Слобода    | 1790                                     | 1925, 1927-1931,<br>1934-1940, 1950-1954              | 26                      |                          | 2,7  |
| 14        | р. Пахра, Макарово                 | 1760                                     | 1938-1954                                             | 18                      |                          | 1,6  |
| 15        | р. Цна,<br>Старый Спас             | 717                                      | 1929-1931, 1933-1940, 1942-<br>1946                   | 16                      |                          | 1,6  |
| 16        | р. Пра, Спас-Клепики               | 3400                                     | 1934, 1935, 1938-1954                                 | 19                      |                          | 1,2  |
| 17        | р. Клязьма,<br>г. Павловский Посад | 5320                                     | 1922-1928, 1930-1933, 1935-<br>1938, 1941-45, 1948-54 | 29                      |                          | 2,6  |
| 18        | р. Клязьма,<br>Городище            | 7900                                     | 1927-1930, 1932, 1934, 1936-<br>1940                  | 15                      |                          | 2,5  |
| 19        | р. Воря, Катлуково                 | 807                                      | 1938-1941, 1944-1946                                  | 7                       |                          | 2,5  |
| 20        | р. Поля, Кривалино                 | 500                                      | 1938-1945, 1947, 1948                                 | 10                      |                          | 1,1  |
| 21        | р. Дубна, Нушполы                  | 1100                                     | 1934-1940, 1947-1951                                  | 12                      |                          | 2,0  |
| Среднее   |                                    |                                          |                                                       |                         |                          | 1,94 |

ный сток и определил ряд рек, с наиболее нарушенным режимом как поверхностного, так и подземного стока. В частности, уже в то время было отмечено, что по ряду малых рек Подмосковья (Ушма, Понырь, Поля, Бужа и др.), находящихся в пределах как региональной, так локальных воронок депрессии, произошло резкое (до 50% в р. Поля) сокращение модулей подземного стока. Среднегодовые модули поверхностного стока сократились при этом в меньшей мере, всего до 12%, что возможно связано как со сбросом в реки возвратных вод, так и с уже начавшимися климатическими изменениями, проявившимися прежде всего на поверхностном стоке.

За прошедшие с тех пор годы произошло не только значительное наращивание количества и продолжительности рядов наблюдений, что позволяет дать многолетнюю характеристику режима подземного стока более обоснованно и оценить более четко проявившиеся, как было отмечено выше, тенденции в изменении климатических условий [7, 8, 52], что проявилось не только в атмосферных осадках и поверхностном стоке, но и в питании подземных вод. Изменилась несомненно за это время и техногенная обстановка в области. В том числе появилось большое количество рассредоточенных по площади водопотребителей (садово-огородных и дачных участков), возросла и эксплуатация основных каменноугольных водоносных горизонтов рассредоточенными по всей области эксплуатационными скважинами и централизованными водозаборами, осуществлены агролесомелиоративные мероприятия, осушены разрабатываемые торфяные месторождения, что сняло часть испарения с грунтовых вод и др. Все это не могло не сказаться на взаимосвязях поверхностных и подземных вод вообще и на естественных ресурсах подземных вод, в частности в этой связи важно установить, в какой мере все эти факторы сказались на подземном стоке и каковы его реальные величины сейчас. Все это необходимо знать как для планирования любого возможного расширения масштабов водоснабжения в регионе, так и для осуществления любых гидрогеологических исследований вообще, включая обоснование естественного восполнения запасов подземных вод при той или иной форме их эксплуатации.

### **7.1.3. Особенности гидрогеологического строения Московского региона**

В гидрогеологическом отношении Московский регион представляет собой Центральную часть Московского артезианского бассейна (МАБ).

Основные продуктивные водоносные горизонты приурочены в основном к отложениям каменноугольного и в меньшей мере мелового и четвертичного возраста. Схема геолого-гидрогеологического строения региона может быть представлена следующим образом (табл. 7.2).

Четвертичные водоносные горизонты развиты в регионе повсеместно. Наибольшую практическую значимость из них имеют аллювиальные

Таблица 7.2

## Гидрогеологический разрез Подмосквья

| Основные водоносные горизонты<br>и подгоризонты                                        | Основные разделяющие<br>слои                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Аллювий пойм (aQ <sub>IV</sub> )                                                       |                                                         |
| Аллювий I и II террас (aQ <sub>III</sub> )                                             |                                                         |
| Флювиогляциальные отложения днепровско-московского межледниковья (fglQ <sub>II</sub> ) | Московская морена (gQ <sub>II</sub> <sup>2</sup> )      |
| Флювиогляциальные отложения окско-днепровского межледниковья (fglQ <sub>I-II</sub> )   | Днепровская морена (gQ <sub>II</sub> <sup>1</sup> )     |
| Нижнемеловой (K <sub>1h</sub> -br) – надпарамоновский                                  | Парамоновские глины (K <sub>1</sub> )                   |
| Надьюрский (J <sub>3v</sub> -K <sub>1v</sub> )                                         |                                                         |
| Среднеюрский (J <sub>2-3</sub> bt-cl)                                                  |                                                         |
| Верхнегжельский (C <sub>3</sub> )                                                      |                                                         |
| Клязьминско-ассельский (C <sub>3</sub> kl-a)                                           |                                                         |
| Кутузовско-ногинский (C <sub>3</sub> kt-ng)                                            |                                                         |
|                                                                                        | Малининские глины (C <sub>3</sub> mln)                  |
| Турабьевский (C <sub>3</sub> trb)                                                      |                                                         |
|                                                                                        | Щелковские глины (C <sub>3</sub> sc)                    |
| Нижнегжельский (C <sub>3</sub> )                                                       |                                                         |
| Перхуровская толща (C <sub>3</sub> prh)                                                |                                                         |
|                                                                                        | Неверовские глины (C <sub>3</sub> nvr)                  |
| Касимовский (C <sub>3</sub> ksm)                                                       |                                                         |
| Ратмировская толща (C <sub>3</sub> rt)                                                 |                                                         |
|                                                                                        | Воскресенские (кревьякинские) глины (C <sub>3</sub> vs) |
| Суворовская толща (C <sub>3</sub> sv)                                                  |                                                         |
| Подольско-мячковский (C <sub>2</sub> pd-mc)                                            |                                                         |
|                                                                                        | Рославльские глины (C <sub>2</sub> gs)                  |
| Каширский (C <sub>2</sub> ks)                                                          |                                                         |
|                                                                                        | Верейские глины (C <sub>2</sub> v)                      |
| Окско-протвинский (C <sub>1</sub> pr)                                                  |                                                         |
| Алексинско-протвинский                                                                 |                                                         |
|                                                                                        | Стешевские глины (C <sub>2</sub> st)                    |
| Серпуховско-окский (Михайловско-тарусский)                                             |                                                         |
| Серпуховский (C <sub>1</sub> s)                                                        |                                                         |
| Упинский (C <sub>1</sub> up)                                                           |                                                         |

водоносные горизонты. При сравнительно невысоких фильтрационных свойствах аллювия ( $k = 5\text{--}10$  м/сут,  $m = 10\text{--}20$  м), но при наличии гидравлической взаимосвязи с поверхностными водами, эти горизонты могут служить надежным источником водоснабжения в основном для сельского населения и небольших поселков. Недостатком этих горизонтов служит их высокая подверженность загрязнению с поверхности земли.

Более надежными в этом отношении являются межморенные водоносные горизонты. В регионе может быть встречено от 2-х до 3-х водоносных горизонтов, приуроченных к водно-ледниковым флювиогляциальным озерно-ледниковым и зандровым отложениям верхнечетвертичного возраста (на севере области), к среднечетвертичным отложениям московского и днепровского межледниковый, а также приуроченных к нижнечетвертичному днепровско-окскому межледниковью. Коэффициенты фильтрации этих преимущественно песчаных пород составляют всего 1–10 м/сут чаще около 5 м/сут. Однако в ряде случаев, особенно в восточной и юго-восточной части региона, в области преобладавшего там ледникового стока в сторону долины р. Дон, эти горизонты представляют нередко единую взаимосвязанную водовмещающую толщу мощностью до 50 м и более. Особую перспективность представляют участки, где флювиогляциальные отложения залегают непосредственно на меловых песках и отложениях карбона без существенных разделяющих слоев. В этих случаях водопроницаемость только рыхлых образований может достигать 200–450 м<sup>2</sup>/сут.

Высокая фациальная изменчивость водноледниковых образований заключается в невыдержанности водоносных горизонтов как по простиранию, так и по мощности с образованием многочисленных «гидрогеологических окон», через которые осуществляется взаимосвязь различных водовмещающих прослоев. Это позволяет рассматривать всю толщу водноледниковых водоносных горизонтов как единый гидравлически взаимосвязанный водоносный комплекс четвертичных отложений. В этот комплекс могут быть включены и водоносные горизонты аллювиальных отложений, прорезающие и дренирующие водноледниковые водоносные горизонты. Именно горизонты этого надъюрского комплекса, приуроченные к зоне активного водообмена, и определяют в наибольшей мере фиксируемые в реках модули подземного стока.

Каменноугольные водоносные горизонты в большей своей части, за исключением отдельных участков на западе и юге региона, обладают затрудненной взаимосвязью с поверхностными водами и могут быть отнесены к зоне замедленного водообмена. Средняя скорость водообмена в Московском артезианском бассейне в естественных условиях составля-

ла, по данным оценок Ф.М. Бочевера, около 100 лет. В условиях интенсивного водоотбора в воронке депрессии в г. Москве скорость водообмена по данным В.В. Романова (по тритию) составляет в среднем около 12 лет. В результате, можно заключить, что вклад каменноугольных водоносных горизонтов, обладающих основными эксплуатационными запасами подземных вод в регионе, в многолетние циклические и трендовые составляющие подземного стока не столь значителен по сравнению с серией верхних перекрывающих карбон водоносных горизонтов, где и формируются основные естественные ресурсы подземных вод и за счет которых осуществляется питание каменноугольных водоносных горизонтов.

Основными региональными областями питания каменноугольных водоносных горизонтов являются западные и южные части бассейна, что хорошо видно по картам гидроизопьез (рис.7.2). Местное питание эти горизонты получают на междуречьях за счет нисходящей фильтрации подземных вод в виде перетекания.

Водоносные горизонты нижнего карбона (серпуховско-окский, протвинский, яснополянский и упинский) распространены на всей территории области. Область их питания располагается, как уже отмечалось, на основных водораздельных пространствах. Однако наиболее высокие пьезометрические уровни (до 200–220 м) отмечены на западе области на междуречье рек Москвы и Днепра. Области разгрузки горизонтов нижнего карбона служат долины основных рек региона – Волга, Ока, Москва и Клязьма, где отметки напоров снижаются до 100–120 м. С погружением этих горизонтов на северо-восток минерализация подземных вод увеличивается, делая их неперспективными для водоснабжения.

Среднекаменноугольные водоносные горизонты (мячковско-подольский и каширский) также развиты на большей части области за исключением западной и юго-западной ее частей (западнее линии Серпухов–Можайск–Старица). Области питания горизонтов служат также междуречья, а областями разгрузки – реки.

Верхнекаменноугольные горизонты (верхнегжельский и нижнегжельский) распространены лишь в северо-восточной половине области по линии Спас–Клепики–Москва–Калинин. На междуречьях (в областях питания этих горизонтов) пьезометрические напоры достигают 150–170 м, а в долинах рек Клязьмы и Волги – 100–120 м.

Гидрогеологические параметры основных водоносных горизонтов варьируются в довольно широких пределах. Так, фильтрационные свойства трещиноватых и не редко закарстованных карбонатных отложений в долинах современных и палеорек могут в 2–3 раза, а иногда и на поряд-

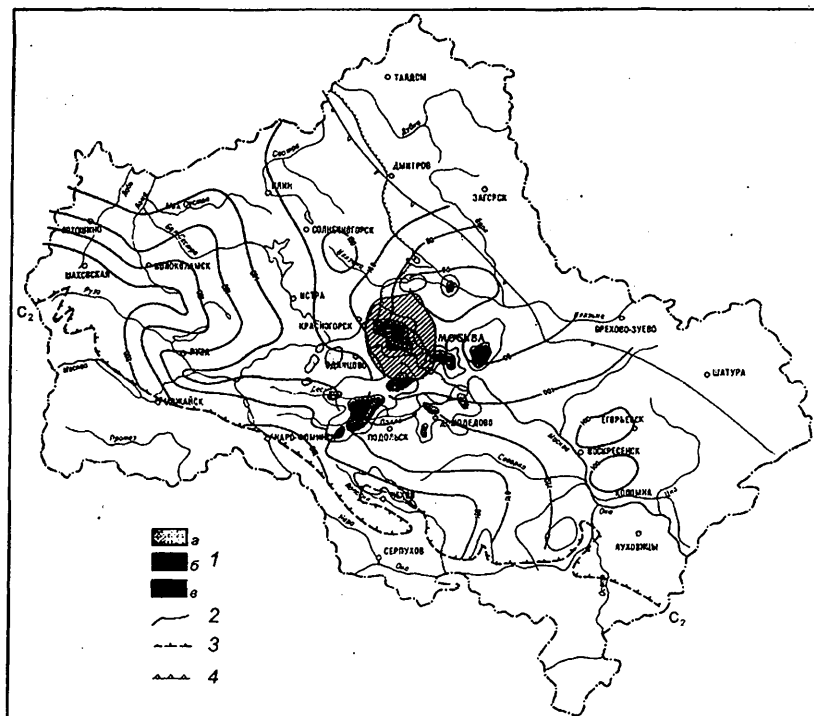


Рис. 7.2. Карта гидроизопьез подольско-мячковского водоносного горизонта (по состоянию на 1987 г.)

1 – зоны понижения уровней водоносного горизонта, м: а – 0–10, б – 10–20, в – >20; 2 – горизонтальные поверхности подземных вод, м; 3 – граница распространения водоносного горизонта  $C_2$ ; 4 – граница распространения пресных вод ( $1 \text{ г/дм}^3$ )

док превышать таковые на ближайших водораздельных пространствах. При этом с увеличением глубины залегания каждого водоносного горизонта их фильтрационные свойства как правило уменьшаются, не редко в 2–3 раза по отношению к вышезалегающему основному горизонту. В результате наибольшей водопроницаемостью обычно обладает первый от поверхности напорный водоносный горизонт, как правило гидравлически взаимосвязанный с грунтовыми водами и рекой.

О возможной изменчивости расчетных параметров по вертикали в условиях относительно благоприятных, выбираемых для сооружения водозаборов, можно судить по данным разведок (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Возможная изменчивость расчетных параметров по вертикали

| Месторождения  | Водоносные горизонты   | Водопроводимость пласта, м <sup>2</sup> /сут. |
|----------------|------------------------|-----------------------------------------------|
| Звенигородское | Аллювиальный           | 60                                            |
|                | Подольско-мячковский   | 270–780 до 2800                               |
|                | Каширский              | 30–540                                        |
| Шернинское     | Грунтовые воды         | 80–150                                        |
|                | Меловой                | 30–50                                         |
|                | Клязьминско-ассельский | 500–1000                                      |
|                | Касимовский            | 800–1500                                      |
| Конаковское    | Подольско-мячковский   | 150–250                                       |
|                | Грунтовые воды         | 100–450                                       |
|                | Межморенный            | 1–200                                         |
|                | Клязьминско-ассельский | 150–5400                                      |
| Приокское      | Касимовский            | 40–250                                        |
|                | Аллювиальный           | 370–415                                       |
|                | Михайловско-тарусский  | 1100–3160                                     |

Усредненно же по региону в целом основные расчетные гидрогеологические параметры оцениваются следующим образом (табл. 7.4) [17].

Несмотря на относительно высокую степень гидрологической изученности Московской области суммарная площадь изученных 34-х водосборов составляет менее одной трети от общей площади области. Осуществить экстраполяцию данных о подземном стоке с изученных водосборов на неизученные и получить таким образом представление о ресурсах подземных вод области в целом можно лишь на основе гидрогеологического районирования территорий. В связи с этим, используя существующие гидрогеологические карты (четвертичных и коренных отложений), а также геоморфологические карты, было осуществлено гидрогеологическое районирование Московской области.

Предпочтение при проведении границ районов отдавалось геоморфологическому районированию, т.е. орографии, косвенно отражающей как различия в геологическом строении территорий, так и в условиях питания и степени дренированности подземных вод. Во внимание при этом принимались также и различия в модулях подземного стока по имеющимся водосборам при решении вопроса об отнесении их к тому или иному гидрогеологическому району, т.к. отмечена зависимость модулей от высотных отметок водосбора. В итоге на территории Московской области было выделено 6 гидрогеологических районов, приуроченных к следующим орографическим территориям.

**Район № 1 – Верхне-Волжской низины.** Район располагается в северной части территории МАБ и приурочен к глубокой дочетвертичной де-

Таблица 7.4

**Гидрогеологические параметры основных водоносных горизонтов  
Московского региона**

| Водоносные горизонты                 | Мощность, м | Коэффициент фильтрации, м/сут. |
|--------------------------------------|-------------|--------------------------------|
| Верхнегжельский, С <sub>3</sub>      | 42          | 30                             |
| Нижнегжельский, С <sub>3</sub>       | 37          | 32                             |
| Мячковско-подольский, С <sub>2</sub> | 50          | 14                             |
| Каширский, С <sub>2</sub>            | 37          | 15                             |
| Серпуховско-окский, С <sub>1</sub>   | 64          | 5                              |
| Упинский, С <sub>1</sub>             | 15          | 10                             |

прессии, выполненной мощной толщей ледниковых четвертичных отложений, перекрывающих юрские и каменноугольные отложения. Современный рельеф района имеет характер плоской равнины с хорошо развитой речной сетью и значительной заболоченностью. Эрозионный врез рек не превышает 50 м.

Четвертичный покров представлен преимущественно мореной и водноледниковыми песками отступавшего московского ледника, а также аллювием по долинам рек. Общая мощность четвертичной толщи изменяется от 40 до 100, редко 130 м. Водоносные флювиогляциальные пески обычно разделены мореной на несколько водоносных горизонтов мощностью от 5 до 50 м, которые в основном и формируют подземный сток в реки на большей части территории.

Для района характерно наличие древних переуглубленных (до 100 м) долин, размывших юрские глины и создающих условия для непосредственной взаимосвязи водноледниковой толщи с каменноугольными водоносными горизонтами, а на востоке района и с пермским горизонтом.

Среднегодовые модули поверхностного стока составляют 5–8,5 л/сек·км<sup>2</sup>.

Основными водоносными горизонтами в этом районе, использующимися для водоснабжения, являются последовательно перекрывающие друг друга по мере продвижения с юга на север каширский, мячковско-подольский, нижнегжельский и верхнегжельский водоносные горизонты, сложенные известняками с прослоями доломитов, реже мергелей. Водупорные породы маломощны, не выдержаны по площади, что обуславливает различную степень взаимосвязи подземных вод как между горизонтами, так и с реками. Наиболее водообильными горизонтами являются верхнекаменноугольные, приуроченные к кутузовско-ногинской и турабьевской свитам клязьминско-ассельского горизонта, залегающие



таблица 7.4 (окончание)

| Водопроницаемость<br>пласта, м <sup>2</sup> /сут. | Пьезопроводность пласта  |                        | Водоотдача<br>пласта |
|---------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|
|                                                   | неглубоких<br>горизонтов | глубоких<br>горизонтов |                      |
| 1300                                              | $5 \cdot 10^4$           | $10^6$                 | 0,04                 |
| 1200                                              |                          |                        |                      |
| 700                                               | $5 \cdot 10^4$           | $10^6$                 | 0,03                 |
| 600                                               | $5 \cdot 10^5$           | $10^7$                 |                      |
| 300                                               | $5 \cdot 10^5$           | $10^7$                 | 0,02                 |
| 150                                               | $5 \cdot 10^4$           | $10^6$                 | 0,03                 |

непосредственно под водноледниковыми отложениями, а также к касимовскому горизонту. Отложения среднего карбона используются в меньшей мере и в основном на востоке. Общая мощность отложений среднего и верхнего карбона составляет 240–300 м. Модули подземного стока в данном районе оцениваются в 2–3, в среднем 2,5 л/сек·км<sup>2</sup> для меженного зимнего стока и до 3–4,5 в среднем 3,8 л/сек·км<sup>2</sup> – для среднегодовых значений подземного стока.

Каменноугольные отложения в целом погружаются в северо-восточном направлении. Мощность перекрывающих их четвертичных отложений в этом направлении увеличивается (от 10 до 130 м). Также на восток растет мощность и юрских глин (до 20–30 м). Воды карбона слабонапорные. Основной областью их разгрузки служит долина р. Волги. Обобщенный схематический разрез дренируемых реками водоносных горизонтов в данном районе представлен на рисунке 7.3.

**Район №2 – Клинско-Дмитровской гряды и Волоколамской возвышенности.** Для данного района, возвышающегося над первым на 60–80 м, характерен более расчлененный рельеф, сложенный с поверхности в основном московской мореной и среднечетвертичными флювиогляциальными отложениями. Характерно для района также широкое развитие мезозойских напорных и слабо напорных водоносных горизонтов, приуроченных к нижнемеловым и верхнеюрским пескам, имеющим мощность в сумме до 80 м. На Клинско-Дмитровской гряде верхняя мезозойско-кайнозойская водовмещающая толща изолирована от каменноугольных горизонтов выдержанными по площади юрскими глинами мощностью до 20–25 м. На Волоколамской возвышенности юрские глины в основном размыты.

Для западной части района характерно более интенсивное расчленение рельефа, многочисленные широкие и выположенные речные долины,



горизонты, так же как и в первом районе, являются основными продуктивными, используемыми для централизованного водоснабжения. Отложения среднего и тем более нижнего карбона на востоке региона залегают на глубинах свыше 200–300 м и содержат солоноватые воды. На западе гидрогеологического района эти горизонты залегают на глубинах до 100 м и вместе с верхнекаменноугольными горизонтами представляют основной практический интерес.

Водоносные горизонты карбона на западе района также перекрыты четвертичными, преимущественно флювиогляциальными и моренными отложениями мощностью от 15 до 100 м.

Подземные воды развиты здесь преимущественно в глинистых песках волжского яруса верхней юры, а также в песках и песчаниках нижнего мела. На самом юге района водоносные отложения представлены также песками, трещиноватыми мергелями, трепелами и опоками верхнего мела мощностью до 120 м.

На стыке первого и второго районов, например в районе р. Вели, встречены переуглубленные долины, выполненные нижнечетвертичными флювиогляциальными отложениями мощностью до 60–70 м, врезающиеся в каменноугольные отложения. В зонах размыва отложения карбона закарстованы.

Фильтрационные свойства горизонтов карбона с глубиной и по мере удаления от гидрографической сети обычно снижаются. Так, коэффициенты фильтрации пород в прирусловых зонах достигают 50–180 м/сут в среднем до 100 м/сут, затухая с глубиной и в сторону водоразделов до 1–50 м/сут.

Наиболее значительное участие в формировании подземного стока в реки принимают воды четвертичных отложений, приуроченные главным образом к флювиогляциальным пескам или пескам и суглинкам древнего аллювия мощностью до 60 м, а также к меловым пескам. Модули межennaleго подземного стока составляют в этом районе от 2 до 3,4, в среднем 2,6 л/сек·км<sup>2</sup>, а среднегодового от 3,2 до 5,2 в среднем 4 л/сек·км<sup>2</sup>.

**Район №3 – полого-холмистой моренной равнины.** Район расположен в центральной части области. В районе повсеместно развиты практически все каменноугольные водоносные горизонты в известняках и доломитах окско-протвинского, каширского, подольско-мячковского, касимовского и клязьминско-ассельского возраста. В соответствии с общей структурой московского артезианского бассейна, т.е. с падением всех слоев в направлении с юго-запада на северо-восток, основными продуктивными на западе района являются средне- и нижнекаменноугольные горизонты, а на востоке главным образом – верхнекаменноугольные.

Наибольшее практическое значение в западной и центральной частях района имеет подольско-мячковский водоносный горизонт, широко используемый здесь для водоснабжения. Средняя мощность водовмещающих пород 40–60 м. Глубины залегания горизонта изменяются с юго-запада на северо-восток гидрогеологического района от 20–30 до 200–250 м с соответствующим изменением напоров. Горизонт подстилается рославльскими глинами и монолитными известняками мощностью 5–12 м, а перекрывается кревкинскими и юрскими глинами (в основном на водоразделах).

В долине р. Москвы подольско-мячковский горизонт располагается непосредственно под водноледниковыми отложениями окско-днепровского и московского периодов, а также аллювиальными отложениями поймы и первой террасы, что создает благоприятные условия для взаимосвязи преимущественно песчаных четвертичных и каменноугольного горизонтов с рекой. В районе между четвертичным водовмещающим комплексом и подольско-мячковским горизонтом залегает мощная песчано-глинистая толща верхней юры.

На самом западе и северо-западе района (Можайский и Рузский районы) под водноледниковыми отложениями особенно в нижнечетвертичных переуглубленных долинах залегает каширский горизонт, подстилаемый верейскими глинами. Нижнекаменноугольный протвинский горизонт залегает здесь на глубинах 100–150 м и может также рассматриваться как основной продуктивный.

Верхнекаменноугольный касимовский горизонт наиболее распространен в восточной половине района по линии Клин–Москва–Раменское. Мощность горизонта 30–50 м, глубина залегания от 15 м по западной границе до 180–200 м на самом востоке района.

В долине Клязьмы от г. Щелково до Павловского Посада и южнее верхнекаменноугольные отложения выходят местами на поверхность земли и имеют безнапорный характер. Горизонт перекрывается щелковскими глинами мощностью 15–20 м, на которых восточнее линии Икша–Балашиха–Электроугли залегает клязьминско-ассельский водоносный горизонт мощностью 40–50 м, который становится на востоке и северо-востоке гидрогеологического района основным.

Нижний карбон используется в данном районе мало, в основном в г. Москве. На востоке района он содержит солоноватые воды. Суммарная мощность основных водоносных горизонтов около 110 м. Коэффициенты фильтрации в среднем около 30–35 м/сут.

На юго-западе и западе территории у поверхности земли развиты водоносные породы среднего карбона, они перекрыты отложениями чет-

вертичного возраста, мощность которых местами достигает 50–60 м, а в долинах рек составляет всего 3–10 м.

На востоке гидрогеологического района в долинах рек Вязь, Воря, Шерна и Киржач четвертичные отложения, представленные разновозрастными флювиогляциальными песками (московскими, днепровскими и окскими) мощностью до 60 м залегают на размытых юрских отложениях, а в нижнечетвертичных переуглубленных палеодолинах – вплоть до верхнекаменноугольных водоносных горизонтов (кутузовского и турабьевского). На большей же части этого района юрский водоупор сохранился.

Воды, заключенные в флювиогляциальных песках среди морен, принимают значительное участие в подземном питании рек и основных водоносных горизонтов. Модули подземного стока в межень составляют здесь 2–4 л/сек·км<sup>2</sup>, в среднем 2,75 л/сек·км<sup>2</sup>, а среднегодовые около 3,3 л/сек·км<sup>2</sup>.

Водоносные глинистые пески юрско-мелового возраста мощностью от 30 до 150 м, развиты спорадически в центральной части и повсеместно на востоке района. Водообильность песков небольшая. В результате эксплуатации подземных вод в Москве и прилегающих породах касимовский горизонт верхнего карбона практически полностью, а подольско-мячковский горизонт среднего карбона частично сдренированы. Даже в районах переуглубленных долин, где юрские глины полностью, а разделяющие эти горизонты воскресенские глины частично размыты, напоры в мячковском горизонте по состоянию на 1997 г. находятся на несколько метров ниже кровли горизонта. Питание последнего осуществляется дождеванием из толщи аллювиальных и флювиогляциальных отложений с соответствующим перехватом части речного стока. В итоге меженные расходы рек, расположенных в зоне региональной воронки депрессии, не могут в полной мере характеризовать естественного питания подземных вод.

**Район №4 – эрозионной Москворецко-Окской равнины.** Основными водоносными горизонтами на северо-востоке района являются подольско-мячковский и каширский водоносные горизонты общей мощностью 30–60 м, а на юге и востоке района нижезалегающий окско-протвинский и серпуховский водоносные горизонты нижнего карбона мощностью до 130 м.

Окско-протвинский горизонт нижнего карбона или в отдельных случаях его подгоризонты алексинско-протвинский и серпуховско-окский (михайловско-тарусский) широко используются для водоснабжения в Серпуховском, Ступинском, Серебряно-Прудском районах, где часто

безнапорный горизонт залегает на глубинах от 10–15 до 100 м. Горизонт перекрывается верейскими глинами мощностью 10–20 м. Севернее, в Чеховском, Наро-Фоминском, Подольском районах, используется больше каширский и подольско-мячковский горизонты, залегающие здесь ближе к поверхности земли до 20–30 м.

На севере и северо-востоке района отложения каменноугольного возраста почти повсеместно перекрыты юрскими глинами и глинистыми песками, а также меловыми песками.

Четвертичные, преимущественно флювиогляциальные отложения развиты на всей территории и наряду с меловыми песками играют значительную роль в подземном питании рек.

Средний модуль подземного стока в межень составляет около  $1,9 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$ , а среднегодовой – около  $2,3 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$ .

**Район №5 – Мещерской низменности.** Для Мещерской низины характерна слабая расчлененность рельефа, слабая дренированность подземных вод и как следствие сильное развитие болот. Реки имеют неглубокие широкие долины с пологими склонами, врезы обычно не превышают 25–50 м. Отметки поверхности земли составляют здесь преимущественно 100–130 м и лишь на водоразделе достигают 140 м. Дренирующее влияние рек распространяется до глубины менее 100 м.

Район приурочен к тектонической депрессии, сформировавшейся в доюрское время. Сильно дислоцированные, эродированные и часто карстованные отложения карбона были затем перекрыты верхне юрскими глинистыми осадками, мощность которых по отдельным эрозионным карманам впадины достигает 50–70 м. Продолжавшееся прогибание впадины обусловило концентрирование в ней водноледниковых потоков как в нижнечетвертичное, так и среднечетвертичное время. Основные водноледниковые потоки, судя по наибольшим врезам палеодолин, шли по видимому вдоль долины р. Серебрянки. В результате (в Мещерской низменности сформировалась довольно мощная толща разновозрастных песков (от  $Q_{IV}$  до  $Q_1$ ), перекрывшая юрские осадки.

Основными продуктивными каменноугольными водоносными горизонтами на севере гидрогеологического района (вдоль Клязьмы) являются верхнегжельский (Кутузовский и Турабьевский водоносный горизонты), а на юге – Касимовский и возможно подольско-мячковский. Спорадическое распространение имеют нижнемеловой и верхнеюрский горизонты, представленные чаще песками, а иногда песчаниками и алевритами мощностью местами до 20–30 м.

Значительное и даже преобладающее участие в формировании подземного стока принимают воды четвертичных отложений, развитых пре-

имущественно в древнеаллювиальных, зандровых и флювиогляциальных песках средне- и нижнечетвертичного возраста. Мощность аллювиально-флювиогляциальной песчаной толщи достигает 30–40 м.

В долинах крупных рек (Ока, Москва и Клязьма), оконтуривающих впадину, происходит разгрузка глубоких вод каменноугольных отложений. Меженные модули подземного стока в данном районе составляют 0,8–1,3 л/сек·км<sup>2</sup>, а среднегодовые – до 2,5 л/сек·км<sup>2</sup>. Грунтовые воды отделены от напорных каменноугольных горизонтов юрским водоупором, который в отдельных местах размыт. Мощность грунтовых вод 15–20 м, в долинах рек до 30–40 м. Глубина залегания уровней грунтовых вод 1–5 м, коэффициенты фильтрации безнапорного горизонта 5–10 м/сут. Водопроницаемость касимовского горизонта изменяется от 10 до 70 м<sup>2</sup>/сут, а в районах озер по-видимому карстового происхождения, достигает 10 тыс. м<sup>2</sup>/сут.

**Район №6 – эродированный склон Средне-Русской возвышенности.** Данный район расположен на правом берегу р. Оки. Для него характерны повышенные до 200–250 м отметки и интенсивное расчленение рельефа. Многочисленные речные долины с высокими крутыми склонами врезаются глубоко в отложения мела и карбона.

Воды средне- и главным образом нижнекаменноугольных отложений развиты повсеместно и приурочены, в основном, к трещиноватым закарстованным известнякам и доломитам упинской, окско-серпуховской и протвинской толщ, представляющих практически единый водоносный комплекс мощностью до 100 м.

В формировании подземного стока принимают также участие воды среднекаменноугольных отложений, сложенных известняками и доломитами каширской толщи мощностью до 30–40 м.

В северо-восточной части района спорадически распространены обводненные песчано-глинистые отложения нижнего мела.

В ледниковый период данный район, представляющий структурный выступ, служил преградой для распространения ледниковых и водноледниковых потоков, которые в окское и днепровское время обтекали этот выступ с запада и востока соответственно по долине Оки в сторону Днепра, а по долинам Осетр, Ока и Проня в сторону Дона. В результате в данном регионе практически отсутствуют сколько-нибудь значимые водноледниковые водоносные горизонты.

Четвертичные флювиогляциальные и гляциальные отложения днепровской морены распространены на отдельных пониженных водоразделах района, исключая крайнюю южную часть, где они отсутствуют. Вклад этих горизонтов в подземном стоке района не существен.

Средний меженный модуль подземного стока составляет 1,7 л/сек·км<sup>2</sup>, а среднегодовой около 2 л/сек·км<sup>2</sup>.

#### **7.1.4. Оценка естественных ресурсов подземных вод**

Для характеристики естественных ресурсов Московской области были использованы практически все существующие гидрологические наблюдения, имеющие продолжительность наблюдений от 18 до 60 лет. Схема размещения постов и их гидролого-гидрогеологическая характеристика представлены на рисунке 6.1.

Как видно из рисунка, степень гидрологической изученности различных гидрогеологических районов не одинакова. На сегодня существуют от 3-х до 13 гидростворов в пределах района. В этой связи в отдельных случаях использовались гидростворы, расположенные за пределами Московской области, вблизи ее территориальных границ, но в пределах соответствующего гидрогеологического района. Это позволило повысить достоверность выбранных средних значений модулей подземного стока, экстраполируемых затем с изученных водосборов на неизученные при расчетах естественных ресурсов подземных вод.

В качестве минимальных годовых значений подземного стока, как уже указывалось выше, выбирались меженные зимние (в основном февральские) расходы рек, определяемые исключительно только разгрузкой подземных вод. Следует еще раз подчеркнуть, что ряды таких значений стока, полученные не расчетом, а фактическими замерами, являются наиболее представительными характеристиками подземного стока или естественными ресурсами подземных вод в данный период года.

Выбор предвесенных меженных значений подземного стока, находящихся в однофазных условиях – на конец гидрологического года, прежде всего диктовался стремлением оценить изменения в водном балансе зоны активного водообмена подземных вод в многолетнем разрезе для изучения закономерностей и генетической структуры этой изменчивости. По таким рядам анализировались многолетние тренды, осуществлялся анализ степени нарушенности режима подземного стока различных водосборов, оценивались диапазоны изменчивости минимальных величин подземного стока различной обеспеченности.

Вместе с тем, учитывая то обстоятельство, что минимальные годовые значения среднемесячных меженных расходов рек в регионе далеко не всегда совпадают с зимней меженью, а не редко фиксируются и в летние месяцы, особенно в периоды засух, для изучения вероятностных законо-



мерностей многолетней изменчивости минимального годового стока и оценок допустимого отъема стока анализировались также ряды из таких разнофазных минимальных годовых значений речного стока. Анализ таких рядов диктовался тем обстоятельством, что именно эти значения подземного стока наиболее часто используются для различных практических целей, связанных с обоснованием гарантированности восполнения эксплуатационных запасов подземных вод на действующих и проектируемых водозаборах, включая и региональные оценки ресурсов подземных вод. По рядам, составленным из таких минимальных годовых среднемесячных значений подземного стока, оценивались и затем картировались модули минимальных среднемесячных значений стока 95% обеспеченности.

Результаты расчетов меженных зимних и минимальных среднемесячных годовых 95% обеспеченности естественных ресурсов подземных вод как по отдельным изученным водосборам, так и осредненные и суммированные по выделенным гидрогеологическим районам области приведены в таблице 7.5.

Среднегодовые значения подземного стока определялись на основе генетического расчленения гидрографа речного стока. Эти значения, как уже отмечалось выше, несмотря на их условность, представляют практический интерес для обоснования условий восполнения срабатываемых запасов подземных вод сравнительно зарегулированных напорных водоносных горизонтов при их форсированной эксплуатации при погашении дефицитов в маловодные периоды. В этой связи для определения среднегодовых значений подземного стока на первом этапе использовались схемы либо с учетом берегового регулирования стока для условий полного или частичного прекращения разгрузки подземных вод в паводок, когда уровни воды в реке оказываются выше и уровней грунтовых вод и напоров первого от поверхности водоносного горизонта, либо схемы с увеличением разгрузки подземных вод в период их питания [28].

Следует отметить, что разработанная Б.И. Куделиным [40] методология расчленения гидрографа рек и определения подземной составляющей их питания на практике может быть реализуема лишь на малых и хорошо изученных водосборах с однотипными и простыми гидрогеологическими условиями. В реальных же условиях для обоснованного расчленения гидрографов, как правило, не хватает необходимой исходной информации, и прежде всего кустов наблюдательных скважин на грунтовые и напорные воды, расположенных створами от уреза рек в сторону коренного склона. Кроме того, меандрирование рек приводит к тому, что участки долин с различными типами дренирования подземных вод

Таблица № 7.5

## Естественные ресурсы подземных вод Московской области

| №№ г/г<br>района   | Меженные зимние                          |     |                           |      | Минимальные годовые                      |     |
|--------------------|------------------------------------------|-----|---------------------------|------|------------------------------------------|-----|
|                    | Средние модули,<br>л/сек·км <sup>2</sup> |     | Q,<br>м <sup>3</sup> /сек |      | Средние модули,<br>л/сек·км <sup>2</sup> |     |
|                    | 50%                                      | 95% | 50%                       | 95%  | 50%                                      | 95% |
| I                  | 1,62                                     | 0,9 | 7,0                       | 4,0  | 1,2                                      | 0,8 |
| II                 | 1,92                                     | 0,9 | 10,0                      | 4,5  | 1,4                                      | 0,7 |
| III                | 2,8                                      | 1,2 | 41,6                      | 17,8 | 2,3                                      | 1,2 |
| IV                 | 1,94                                     | 1,0 | 20,2                      | 10,3 | 1,8                                      | 0,7 |
| V                  | 1,47                                     | 0,3 | 12,9                      | 3,1  | 0,8                                      | 0,3 |
| VI                 | 1,7                                      | 1,0 | 3,5                       | 2,2  | 1,4                                      | 0,9 |
| В целом по области |                                          |     | 95,2                      | 41,9 |                                          |     |

многократно чередуются. В результате оценить количественный вклад различных условий дренирования подземных вод по данным замеров в замыкающем створе (т.е. с учетом берегового регулирования, без него, с разгрузкой напорных вод или без нее) практически невозможно. Все это приводит к значительной доле субъективности вносимой в процедуру расчленения гидрографов рек, делающей оценку среднегодовых значений подземного стока неоднозначной и мало достоверной. Особенно произвольной такая методология расчленения становится при сложном характере гидрографа рек с несколькими паводковыми пиками и растянутыми во времени паводками и спадами стока. Формальное «вырезание» подземного питания в паводок по гидрографу реки во многих случаях, особенно при отмеченном сложном характере гидрографа, приводит к тому, что среднегодовой подземный сток оказывается меньше меженного зимнего. Все это предопределило неприемлемость использования таких подходов для оценок среднегодовых значений подземного стока в рассматриваемом регионе.

Более надежными здесь могли бы быть замеры конкретного приращения подземного стока между различными гидростворами по реке в пределах однотипных естественных гидрогеологических условий. Однако таких створов в изучаемом регионе с ненарушенным режимом стока практически нет. В этой связи для оценок среднегодовых значений подземного стока был использован предложенный нами ранее способ, основанный на совместном анализе данных режима уровней подземных вод на водосборе, за пределами зоны берегового регулирования, и режима поверхностного стока [28]. Сущность этого способа кратко заключается в следующем.

Принимая во внимание то, что амплитуды колебаний уровней подземных вод в значительной мере зависят от глубины залегания

таблица 7.5 (окончание)

| Минимальные годовые          |      | Среднегодовые                            |                              |
|------------------------------|------|------------------------------------------|------------------------------|
| $Q$ ,<br>м <sup>3</sup> /сек |      | Средние модули,<br>л/сек·км <sup>2</sup> | $Q$ ,<br>м <sup>3</sup> /сек |
| 50%                          | 95%  | 50%                                      | 50%                          |
| 5,3                          | 3,3  | 2,1                                      | 9,2                          |
| 7,6                          | 3,6  | 2,65                                     | 13,1                         |
| 34,2                         | 17,8 | <b>4,2</b>                               | <b>62,5</b>                  |
| 19,1                         | 7,4  | <b>2,3</b>                               | <b>30,4</b>                  |
| 8,0                          | 3,0  | 1,9                                      | 35,6                         |
| 3,1                          | 2,0  | 2,1                                      | 4,7                          |
| 77,3                         | 37,1 |                                          | 155,5                        |

грунтовых вод и фильтрационных свойств пород и поэтому на водосборе они могут быть существенно различными, график колебаний уровней представляется в нормированном виде – либо в долях единицы ( $\lambda$ ) или в процентах от размаха внутригодовых изменений мощности водоносного горизонта, либо в процентах обеспеченности уровней. Для этого каждому среднемесячному значению уровней грунтовых вод по выбранной для анализа скважине придается эквивалентное, долевое или процентное значение его превышения над минимальным годовым (рис. 7.4а). Так, например, при построении графика внутригодовых колебаний уровней и расходов подземных вод в долях единицы, за единицу принимается годовая амплитуда колебаний уровней или расходов подземных вод. Значения нормированных среднемесячных уровней подземных вод ( $\bar{h}_i$ ) в процентном отношении от внутригодового разма-

ха колебаний уровней определяется по формуле  $\lambda = \frac{h_i - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \cdot 100\%$ ,

где  $h_i$  – фактическое среднемесячное значение уровней каждого месяца;  $h_{\max}$  и  $h_{\min}$  – максимальное и минимальное среднемесячное значение уровней в пределах анализируемого года, соответственно.

Затем по периоду независимого спада уровней грунтовых вод и поверхностного стока (обычно по разности среднемесячных значений января и марта или февраля) определяется удельный подземный сток ( $q$ ), соответствующий снижению расхода поверхностного стока на 1% снижения уровней грунтовых вод (рис. 7.4б):

$$q = \frac{Q_3 - Q_1}{h_3 - h_1} = \frac{\Delta Q}{\Delta h} \quad \text{м}^3 / \text{сек} \cdot \%$$

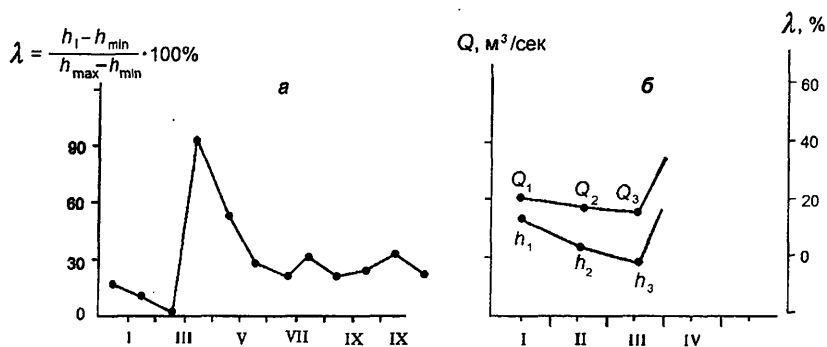


Рис. 7.4. Графики внутригодовых соотношений среднеемесячных значений уровней подземных вод каждого месяца и минимального среднеемесячного годового уровня (а), а также хронологических изменений уровней подземных вод ( $h$ ) и расхода реки в межень ( $Q$ ) (б)

Расчет внутригодовых изменений подземного стока определяется для каждого месяца года в отдельности по формуле

$$Q_{\text{подз},i} = Q_{\text{мск.}} + q \cdot \lambda_i \%, \text{ м}^3/\text{сек},$$

где  $Q_{\text{подз},i}$  – подземный сток каждого  $i$ -ого месяца;  $Q_{\text{мск.}}$  – минимальный годовой речной сток, определяемый разгрузкой подземных вод;  $\lambda_i = \Delta h_i$  – превышение уровней грунтовых вод каждого  $i$ -ого месяца над минимальным годовым уровнем в процентах от годовой амплитуды уровней.

Примеры выполненных подобным способом расчетов внутригодовой изменчивости подземного стока по ряду водосборов региона приведены на рисунке 7.5. -

Как видно из рисунков, подземный сток существенно переменен внутри года и закономерно возрастает в периоды питания подземных вод. Устанавливаются также в отдельных случаях периоды года, когда подземный сток превышает поверхностный, что может быть определено, как уже указывалось выше, испарением части подземного стока в промежуточных областях разгрузки подземных вод, так и разбором поверхностного стока на хозяйственные нужды.

Представление колебаний уровней грунтовых вод в нормированном виде принципиально позволяет использовать для данных целей скважины, не расположенные в пределах изучаемого водосбора, если таковые в

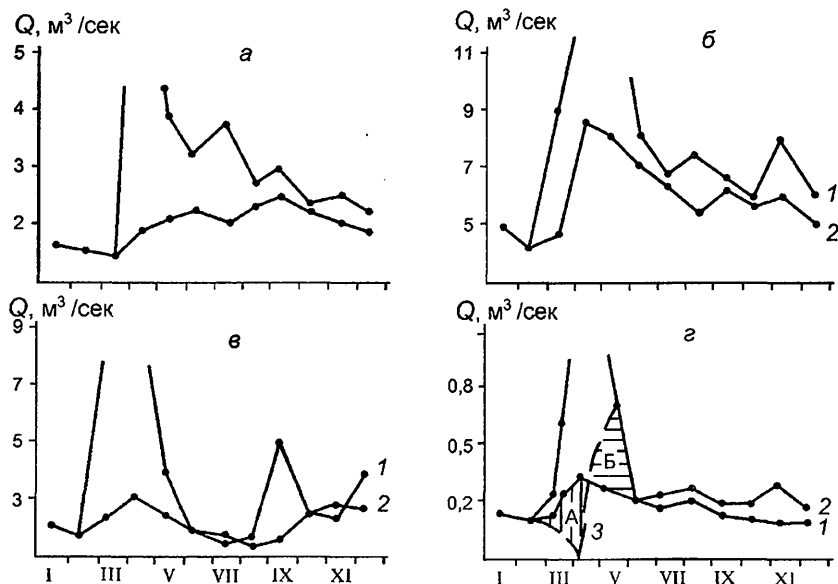


Рис. 7.5. Схемы расчленения гидрографов рек на подземную и поверхностную составляющие: р. Северка – Покровское (а); р. Сестра – Трехсвятское (б); р. Нара – Наро-Фоминск (в); р. Катыш – Троицкое (г)

1 – расходы рек; 2 – подземный сток; 3 – схема учета берегового регулирования поверхностного стока; А – объем задержанного подземного стока, Б – объем возвращенного задержанного стока

его пределах отсутствуют. Однако эти скважины должны находиться в зоне синхронного режима подземных вод, обычно в радиусе не превышающем 100 км, и по возможности на минимальном удалении от водосбора. В этом случае подобные скважины в состоянии охарактеризовать с удовлетворительной достоверностью особенностью погодных изменений внутри года на водосборе и соответствующую изменчивость питания и расхода подземных вод в регионе. Вместе с тем некоторые неточности в оценках подземного стока в таких случаях, как показывает опыт, не исключены, т.к. каждый водосбор специфичен и полной аналогии в режиме подземных вод даже представленного в нормированном виде при этом ожидать трудно. Во всех случаях для анализа необходимо выбирать скважины, не находящиеся в зоне подпорного режима от рек, а отражающие естественный фоновый климатический режим подземных вод.

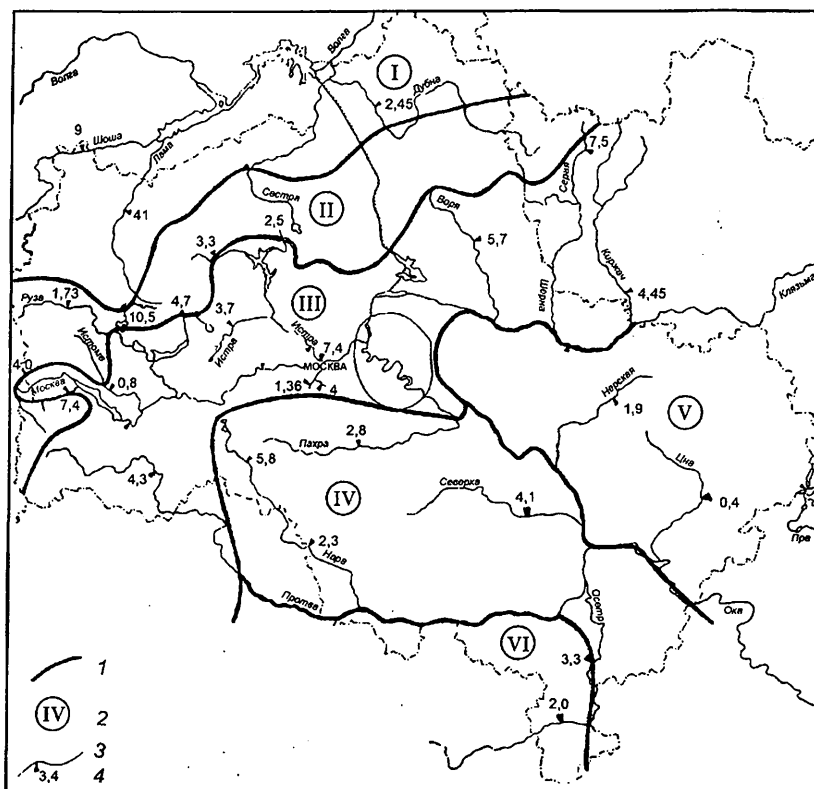


Рис. 7.6. Перспективные возобновляемые эксплуатационные ресурсы подземных вод малых водосборов Московского региона

1 – границы гидрогеологических районов; 2 – номера гидрогеологических районов; 3 – опорные гидрогеологические посты; 4 – потенциальные располагаемые ресурсы, линейный модуль в л/сек-км

Полученный таким способом график подземного стока отражает в объемном выражении истинное годовое подземное питание рек. Для получения представлений о календарном подземном питании рек, в том числе и в период паводка, если это необходимо, полученный график внутригодового распределения подземного стока может быть трансформирован с таким расчетом, чтобы объем задержанной подпором разгрузки подземных вод и частичной интрузии речных вод в водоносный гори-

зонт (площадь А на графике г) соответствовала объему возвращенного после пика паводка стока сверх расчетного фактического подземного стока (площадь Б). Схема расчленения гидрографа для такого случая, то есть с учетом берегового регулирования, иллюстрируется на графике (см. рис.7.5г). Для выделения площадей А и Б, как видно из графика, также необходимо первоначально определить истинный подземный сток с водосбора.

Данный способ расчленения гидрографа рек также не является идеальным, т.к. далеко не всегда можно найти наблюдательную скважину с естественным режимом в пределах изучаемого водосбора, не всегда можно быть уверенным в естественном режиме поверхностного стока, процедура расчленения довольно трудоемка для региональных исследований, базирующихся на массовом фактическом материале и др. Однако он позволяет с большей степенью достоверности по сравнению с другими способами оценить наиболее вероятные вариации подземного питания рек на генетической основе.

Принимая во внимание трудоемкость процедуры расчетов внутригодовой изменчивости подземного стока по многолетним рядам наблюдений и тем более по всему региону в целом, а также учитывая прикидочный характер выполняемых оценок, подобные расчеты были осуществлены нами лишь для характерных водосборов и только для средних по водности лет. Для этого из числа водосборов в пределах каждого гидрогеологического района были выбраны 1–2 типичных гидроствора с модулями меженного подземного стока близкими к средним по району. По графикам обеспеченности среднегодовых значений речного стока по этим водосборам для анализа были выбраны те годы, в которых значения среднегодовых и меженных зимних значений были близки к 50% обеспеченности. По таким годам и было осуществлено построение гидрографов подземного стока с определением его внутригодового распределения, расчетов среднегодовых расходов и модулей.

По выполненным таким способом оценкам среднегодовых модулей подземных вод по каждому из гидрогеологических районов было определено соотношение среднегодовых и меженных зимних модулей подземных вод, которые составили от 1,2 до 1,5, в среднем 1,35. Эти соотношения и были затем использованы для приближенных оценок среднегодовых значений естественных ресурсов подземных вод по каждому из остальных водосборов.

Следует отметить, что среднемноголетние модули подземного стока, а следовательно и среднемноголетние естественные ресурсы подземных вод 50% обеспеченности не редко в 3–4 раза превышают минимальные

среднемесячные ресурсы подземных вод 95% обеспеченности, из расчета на которые часто ведется оценка эксплуатационных запасов подземных вод. Это свидетельствует о важности учета как внутригодового распределения подземного стока, так и многолетней изменчивости меженных расходов подземных вод.

При необходимости проведения более детальных исследований на основе рассмотренного выше методического подхода может быть изучено внутригодовое распределение подземного стока по всем годам и участкам существующих наблюдений с соответствующим статистическим анализом полученных рядов среднегодовых расходов и объемов подземного стока.

Необходимо также еще раз подчеркнуть, что Московская область относится к одному из наиболее урбанизированных районов с значительно нарушенным водным балансом в целом. Степень и характер нарушения речного стока различны. Часть рек (Москва, Руза, Истра, Клязьма) зарегулированы водохранилищами. Ряд рек (Протва, Нара, Лусьянка, Пахра, Протва, Нара, Нерская, Цна) находятся в зоне влияния регионального водоотбора и несут следы влияния агрометеорологических мероприятий на водосборах. При этом техногенные воздействия на сток начались по разным водосборам в 1935–1937, 1948–1950 и 1960 гг. В результате значительная часть существующих рядов наблюдений характеризует не природную, а сложившуюся на водосборе техногенную обстановку. Поэтому, если для оценок эксплуатационных запасов подземных вод с учетом перехвата речного стока, можно ориентироваться на сформировавшийся современный режим речного стока, то для оценок гарантированности восполнения запасов подземных вод, а в ряде случаев и для калибровки гидродинамических моделей, должны использоваться данные только по естественному питанию подземных вод. Поэтому для оценок естественных ресурсов подземных вод, основанных на средних по районам модулях подземного стока, использовались только водосборы с относительно ненарушенным режимом поверхностных вод.

Для выявления водосборов с нарушенным режимом поверхностных вод и определения времени, с которого начало проявляться влияние техногенеза на подземный сток, был использован прием построения двойных интегральных кривых по парам водосборов [18]. Для этого в пределах изучаемого гидрогеологического района или в соседнем районе выбирался водосбор с заведомо естественным режимом меженного зимнего подземного стока. С последовательно суммируемыми годовыми значениями подземного стока по этому водосбору коррелировались такие же интегральные ряды по другим водосборам гидрогеологического района.



Пример такого графика приведен на рисунке 5.2. Построение таких графиков позволило выявить водосборы с относительно естественным режимом подземных вод (с точками, лежащими на прямую), водосборы с влиянием интенсивного водоотбора, с точками, отклоняющимися от прямой вниз, т.е. с перехватом части подземного стока даже на фоне его роста, и с влиянием появившегося дополнительного питания подземных вод, т.е. с точками, отклоняющимися вверх от прямой за счет переброски воды с других водосборов, мелиорации заболоченных территорий, а также за счет возвратных вод от водоотбора из напорных горизонтов, использования этих вод на орошение, утечек из водонесущих коммуникаций и др. Моменты отклонения кривых от прямых определяют время начала нарушений режима подземных вод.

Для определения естественных модулей подземного стока использовались ряды наблюдений за период до начала отклонений точек графика от прямой. Именно эти модули, усредненные по каждому гидрогеологическому району, экстраполировались затем с изученных площадей на неизученные.

Для получения представлений о современных расходах подземного стока, отражающих техногенную обстановку на водосборе, оценивались модули подземного стока по отрезкам рядов с начала зафиксированного таким способом нарушения естественных условий формирования подземного стока.

Результаты выполненных расчетов среднемесячных меженных зимних 50% обеспеченности, минимальных среднемесячных годовых значений 95% обеспеченностей модулей и ресурсов подземных вод, а также среднегодовых многолетних модулей и ресурсов подземных вод по каждому гидрогеологическому району и области в целом приведены в таблице 7.5. Как видно из таблицы, среднемноголетние 50% обеспеченности меженные естественные ресурсы подземных вод области составляют  $95,7 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а 95% обеспеченности всего около  $42 \text{ м}^3/\text{сек}$ , т.е. примерно столько, сколько сейчас уже отбирается подземных вод.

Среднегодовое питание подземных вод всей области составляет около  $155 \text{ м}^3/\text{сек}$ . При этом значительная часть этого питания осуществляется в пределах существующей региональной воронки депрессии, где реального наращивания эксплуатационных запасов подземных вод ожидать трудно. «Свободных» для использования ресурсов подземных вод по периферии области в итоге остается около  $70\text{--}80 \text{ м}^3/\text{сек}$ . При этом, если учесть, что эти ресурсы распределены по значительной площади, и использовать их полностью невозможно, то становится очевидным невозможность решения проблем не лимитированного временем беспере-

бойного водоснабжения региона только за счет подземных вод без истощения их запасов.

Интересно сопоставить результаты оценок подземного стока шестидесятих годов, выполненных Н.А. Лебедевой, и современных данных. Так, среднегодовые модули по Н.А. Лебедевой варьировались в пределах 1,1–3,5 л/сек·км<sup>2</sup>, а сейчас от 1,9 до 4,2 л/сек·км<sup>2</sup>. Минимальные модули ранее варьировались в пределах от 0,2 до 1,8 л/сек·км<sup>2</sup>, а сейчас от 0,8 до 2,3 л/сек·км<sup>2</sup>. Средние по области значения среднегодовых и минимальных модулей также изменились соответственно с 1,94 и 0,86 л/сек·км<sup>2</sup> до 3,5 и 1,2 л/сек·км<sup>2</sup>. Другими словами, за прошедшие 30 лет питание подземных вод в регионе возросло примерно в 1,5 раза. При этом значительную роль в этом сыграли техногенные факторы, что выделило данный регион как аномальный в масштабах волжского водосбора в целом (см. рис.6.17). Однако, как было показано выше, в этом процессе имела место и климатическая составляющая.

Тем не менее, даже с учетом постоянной тенденции к увеличению питания подземных вод, которая, как будет показано ниже, должна сохраниться, перспектив водообеспечения района только за счет ресурсов подземных вод немного.

Сопоставление регионально оцениваемых естественных ресурсов подземных вод и прогнозных эксплуатационных ресурсов показывает значительное (иногда в 2 раза) превышение первых над вторыми. Связано это прежде всего с тем, что прогнозные эксплуатационные ресурсы оцениваются применительно к основным продуктивным водоносным горизонтам. Естественные же ресурсы характеризуют питание и разгрузку подземных вод всех горизонтов интегрально.

Кроме того, следует учитывать то обстоятельство, что все эти ресурсы невозможно использовать без неизбежных негативных последствий в окружающей среде. Поэтому необходимо, как уже указывалось выше, оценивать потенциальные или располагаемые эксплуатационные ресурсы подземных вод.

## **7.2. Потенциальные эксплуатационные ресурсы поверхностных и подземных вод малых водосборов**

Под потенциальными или перспективными эксплуатационными ресурсами подземных вод понимается часть естественных ресурсов подземных вод, которую можно перехватить инфильтрационными водозаборными сооружениями в долинах малых рек без экологических рисков. В

отличие от применявшегося ранее аналогичного термина, используемого для оценок по существу не ресурсов, а потенциальных запасов подземных вод, рассчитываемых приближенными гидродинамическими методами с учетом срока сработки емкости пласта, в предлагаемом понятии этого термина заключено принципиально иное содержание, характеризующее минимальное допустимое использование постоянно восполняемых ресурсов подземных вод, обеспечивающих неограниченное и бесперебойное во времени водоснабжение с условием сохранения существующего экологического равновесия на водосборе, то есть в пределах допустимых отъемов стока.

Как показали приведенные выше оценки потенциальные или для исключения смещения понятий располагаемые перспективные эксплуатационные ресурсы подземных вод малых водосборов составляют в Московском регионе в среднем 20% от минимальных среднемесячных естественных ресурсов подземных вод 95% обеспеченности. Поэтому для наиболее обобщенных представлений о минимальных перспективных эксплуатационных ресурсах подземных вод по каждому гидрогеологическому району в целом можно использовать как соответствующие доли от средних по району модулей подземного стока минимальных среднемесячных 95% обеспеченности, так и от оцененных по ним суммарных минимальных естественных ресурсов подземных вод (см. табл. 7.5).

Для оценок располагаемых перспективных эксплуатационных ресурсов подземных вод по отдельным конкретным водосборам нагляднее и информативнее для целей планирования использования подземных вод оценивать и картировать линейные модули подземного стока в л/сек на погонный километр. Такой подход позволяет охарактеризовать перспективные эксплуатационные ресурсы не в среднем по району, а применительно к наиболее крупным из малых водосборам, в которых заложение водозаборов наиболее перспективно и где реально могут быть сосредоточены представляющие практический интерес ресурсы подземных вод. Такой подход был использован для составления карты перспективных эксплуатационных ресурсов подземных вод Московского региона (рис 7.6).

Для решения этой задачи по всем водосборам, где имеются данные многолетних наблюдений, были оценены минимальные среднемесячные расходы рек 95% обеспеченности. По этим расходам рассчитывался линейный модуль подземного стока, соответствующий 20% от минимального расхода реки.

Эти модули использовались затем для экстраполяции с изученных участков на неизученные в пределах соответствующих гидрогеологических районов. При этом в зависимости от степени достоверности подоб-

ных экстраполяций потенциальные или перспективные эксплуатационные ресурсы подземных вод отдельных водосборов можно разделить на 3 категории:

$\Pi_1$  – потенциальные ресурсы подземных вод изученных водосборов (выше по течению от гидроствора),

$\Pi_2$  – потенциальные ресурсы подземных вод, оцененные по экстраполяции линейных модулей с изученной части водосбора на неизученную – ниже по течению от гидроствора и

$\Pi_3$  – потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод, оцененные по экстраполяции средних по гидрогеологическому району линейных модулей на неизученные водосборы.

Суммарные располагаемые эксплуатационные ресурсы подземных вод, оцененные подобным способом (т.е.  $\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3$ ) по каждому гидрогеологическому району, оказались вполне естественно ниже таковых, оцененных через модули подземного стока, т.к. вне поля зрения остались совсем малые водосборы, пригодные лишь для рассредоточенной эксплуатации подземных вод одиночными скважинами.

В результате выполненных оценок было определено, что суммарные перспективные или располагаемые эксплуатационные ресурсы подземных вод в области составляют всего около 7,5 м<sup>3</sup>/сек, а по отдельным гидрогеологическим районам лишь 0,5–3,6 м<sup>3</sup>/сек. Линейные модули этих ресурсов изменяются в пределах от 0,4 до 9,0 л/сек на км, чаще в пределах 3–4 л/сек на км.

При этом наиболее высокие значения линейных модулей связаны не столько с более высокой водообильностью отложений, сколько с неучтенными притоками, отсутствующими на мелкомасштабных картах. В этой связи, подобные оценки целесообразно использовать лишь при наиболее полном учете протяженности гидрографической сети. Минимальный линейные модули характерны для водосборов небольшой (менее 300 км<sup>2</sup>) площади, что связано с неполным дренированием подземных вод, то есть с существенной долей питания глубоких водоносных горизонтов.

Наиболее перспективными, как видно из карты (см. рис. 7.6), являются северо-западные и северо-восточные районы области. Однако и эти перспективы весьма скудны, что не позволяет рассчитывать организацию бесперебойного и неограниченного во времени водоснабжения населения области только за счет естественных ресурсов подземных вод. Все это еще раз подчеркивает целесообразность совместного использования поверхностных и подземных вод, что позволит повысить возможности использования водных ресурсов в несколько раз.

Сопоставление цифр располагаемых эксплуатационных ресурсов подземных вод и оцененных в регионе эксплуатационных запасов подземных вод показывает значительное превышение последних над первыми. Это означает, что только та часть эксплуатационных запасов, которая соответствует располагаемым эксплуатационным ресурсам подземных вод, может использоваться неограниченно долго и будет обеспечена питанием. Использование же той части запасов, которая превышает располагаемые эксплуатационные ресурсы, неизбежно приведет к истощению этих запасов и к возможным негативным экологическим последствиям в окружающей среде, что уже и наблюдается.

---

## *Глава 8*

# **ВЛИЯНИЕ ПРЕДСТОЯЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РЕГИОНА**

### **8.1. Особенности сверхдолгосрочных гидрогеологических прогнозов**

Приведенный выше анализ многолетних рядов наблюдений показал значительную изменчивость подземного стока во времени. В том числе, отмечалось наличие трендов в меженных расходах подземного стока. В связи с этим возникает вопрос в какой мере полученные результаты оценок могут быть использованы для практических решений, рассчитанных на использование подземных вод в будущем. В какой мере эти тенденции определены техногенными воздействиями на водный баланс региона или начавшимися климатическими изменениями следует в каждом конкретном случае специально устанавливать. Для этого прежде всего необходимо оценить и спрогнозировать климатическую компоненту этих изменений, что позволит затем выделить и их техногенную составляющую.

Прогнозы режима подземных вод вообще и в связи с изменениями климата, в частности, необходимы для решения многочисленных практических задач, в том числе, для определения вероятной подтопленности городов и сельскохозяйственных угодий, для оценок естественных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод, прогнозов активизации различных геодинамических и инженерно-геологических процессов (карста, оползней, просадок), оценок изменений меженных расходов рек, определяемых разгрузкой подземных вод, изменений экологического состо-

яния связанных с подземными водами наземных экосистем, медико-биологической обстановки и т.д.

Методология прогнозов режима подземных вод и прежде всего гидродинамического режима (уровней и расходов подземных вод) разработана в целом достаточно хорошо [13, 24, 25, 34], что позволяет сегодня с той или иной степенью достоверности и вероятности получить представление о возможных изменениях режима подземных вод с заблаговременностью от нескольких первых месяцев до 1–2 лет. Наибольшее распространение в нашей стране получили сезонные прогнозы режима уровней подземных вод, составляемые систематически дважды в год уже около 20 лет и показывающие достаточно приличную оправдываемость.

Долгосрочные и даже сверхдолгосрочные прогнозы режима и ресурсов подземных вод в связи с техногенными трансформациями климата пока не составлялись и не апробировались. Принципиальные отличия и особенности таких прогнозов по сравнению с ранее используемыми требует с одной стороны, соответствующих методологических усовершенствований, а с другой обоснования принятия определенных допущений. В том числе такие прогнозы имеют следующие требующие учета особенности.

1. *Неопределенная заблаговременность составления прогнозов.* Существующие климатологические прогнозы могут быть отнесены к категории «временных» лишь условно. Выделяются они обычно для трех этапов или сценариев изменений климата: при условии глобального потепления на 1, на 2 и на 3–4°C. Строятся такие прогнозы обычно на базе палеореконструкции и сопоставляются по аналогии с наблюдавшимися изменениями климата в прошлом. В том числе рассматриваемые сценарии сопоставляются с изменениями климата, наблюдавшимися, соответственно, в оптимумах голоцена (5,5–6,5 тыс. лет назад), миклулинского межледниковья (125–130 тыс. лет) и плиоцена (3,3–4,3 млн лет назад). Когда наступят соответствующие потепления климата, точно предсказать никто не может. Предполагается, что первый этап прогнозируемых изменений при сохранении наблюдаемых темпов увеличения концентраций парниковых газов в атмосфере можно ожидать в начале текущего столетия, второй – во втором его десятилетии, а третий – во второй половине начавшегося столетия. В итоге судить о реальных темпах изменений во времени климатологических характеристик не представляется возможным. Соответственно невозможно спрогнозировать и градиенты трендов в гидрогеологических процессах, т.к. очевидно, что по трем точкам, разнесенным по-разному во времени, можно получить разные уклоны тренда. По существу, выполняемые оценки носят характер не прогноза, а

расчета для трех условно распределенных во времени этапов при заданных изменениях климатических характеристик и при условии, если они реализуются.

2. *Недостаточность исходной информации для достоверных прогнозов-расчетов.* Довольно обширный опыт составления календарных прогнозов режима подземных вод в нашей стране показал [22, 23], что наибольший весовой вклад в прогнозируемые изменения уровней и расходов подземных вод (иногда до 60–80%) вносят значения этих уровней (расходов), известных на период составления прогнозов. Вклад же атмосферных осадков, известных на момент прогнозов, составляет лишь 10–30%, а температур воздуха и того меньше (лишь первые проценты). При прогнозировании режима подземных вод под влиянием изменений климата вообще, и тем более для второго и третьего этапов, учесть поведение уровней или расходов подземных вод на предшествовавшем этапе не представляется возможным. Кроме того, климатологические прогнозы чаще всего не дают количественных представлений о внутригодовом распределении осадков и испарения. Питание же подземных вод, а следовательно и их режим, определяются, как известно, преимущественно за счет эффективных осадков холодного периода года. Корреляционные же связи между осадками холодного периода и среднегодовыми их значениями обычно не высоки, что затрудняет косвенный учет первых по вторым. Необходимо также отметить и грубость прогнозных климатических изменений, картируемых чаще всего лишь на слишком мелкомасштабных картах для всего земного шара или полушарий в целом. Все это не позволяет рассчитывать на удовлетворительную точность гидрогеологических прогнозов.

3. *Неверифицируемость подобных сверх долгосрочных и дискретных во времени прогнозов.* Как также известно, верификация прогнозов осуществляется на первом этапе на базе эпигнозных расчетов, сопоставляя по ряду критериев полученные по прогнозным уравнениям расчетные и фактически наблюдавшиеся данные по многолетним рядам наблюдений [22]. При этом расчетное уравнение строится либо по данным всего имеющегося ряда наблюдений, либо по искусственно укороченному ряду в целях проверки достоверности прогноза на отрезке ряда, не участвовавшем в составлении прогнозного уравнения. На втором этапе осуществляется оценка оправдываемости прогнозов по факту его сопоставления с реализовавшимся ранее не наблюдавшимся процессом. Заблаговременности всех трех этапов (сценариев) климатологических прогнозов столь велики, что осуществить реальную оценку степени оправдываемости прогнозов и убедиться в их достоверности практически невозможно. Более



того, гидрогеологические прогнозы при решении данной задачи основываются не на фактических, а на прогнозных климатологических данных, в свою очередь не поддающихся реальной верификации, т.к. подобных работ по проверке оправдываемости климатологических прогнозов даже на промежуточных интервалах первого этапа (сценария) изменений климата пока не было.

Все это предопределяет чрезвычайно низкую достоверность подобных сверхдолгосрочных прогнозов режима и ресурсов подземных вод. К результатам таких прогнозов можно относиться лишь как к оценкам вероятной направленности (знаку) возможных изменений в будущем изучаемых процессов и определению примерного порядка возможных изменений в этих процессах. Однако следует подчеркнуть, что и такие весьма приближенные оценки могут иметь практическое значение для обоснования своевременного планирования водохозяйственных и водоохраных мероприятий, выбора первоочередных районов для организации мониторинга подземных вод и направленности изучения изменений гидрогеологических условий и взаимосвязанной с ними окружающей среды, долгосрочного планирования мелиоративных работ, обоснования защитных дренажей при капитальном строительстве и борьбы с подтоплением городов или хотя бы для показа необходимости изучения данного явления и его учета в той или иной мере при решении конкретных практических задач.

Приближенность, по существу экспертный характер рассматриваемых прогнозных оценок и используемых для них исходных данных, определяет нецелесообразность использования для них неадекватно трудоемких и сложных методов прогнозов. Различная целевая направленность таких прогнозов диктует необходимость рассмотрения возможных методов прогнозов, позволяющих давать как обобщенные региональные прогнозные оценки, так и прогнозы на детальных участках и даже в конкретной наблюдательной точке.

## 8.2. Методы прогнозов

Исходя из этих предпосылок, рассмотрев различные варианты возможных методических подходов к прогнозированию режима и ресурсов подземных вод в связи с климатическими изменениями, можно рассмотреть для данных целей следующие варианты методов прогнозов [34].

1) На основе установленных обобщенных зависимостей долей атмосферных осадков, участвующих в питании подземных вод, от степени водности года.

2) На основе установленных множественных корреляционных связей прогнозируемых изменений в подземных водах от комплекса прогнозируемых климатических параметров.

3) На основе моделей с сосредоточенными параметрами по отдельным типичным водосборам.

4) На основе экстраполяции многолетних трендов, вскрываемых в уровнях и расходах подземных вод.

Учитывая то, что все эти подходы в целом известны и в том числе апробированы нами для решения различных задач [24, 31], здесь мы остановимся лишь на их особенностях, необходимых допущениях и усовершенствованиях или адаптации их применения, связанных с изложенной выше проблемой. При этом, принимая во внимание то, что наибольшую практическую значимость имеют прогнозы возможной изменчивости ресурсов подземных вод в будущем, рассмотрим в первую очередь прогнозы возможной изменчивости фиксируемого в реках подземного стока, характеризующего минимальные гарантированные естественные ресурсы подземных вод.

### **8.2.1. Прогнозы, основанные на зависимостях коэффициента подземного стока от степени водности года**

Как известно, коэффициент подземного стока отражает выраженную в процентах долю атмосферных осадков, участвующих в питании подземных вод и рассчитывается по формуле:

$$K_n = \frac{Q}{P} \cdot 100 \%, \quad (8.1)$$

где  $Q$  – среднегодовая величина подземного стока в мм слоя воды;  $P$  – среднегодовая величина атмосферных осадков, также в мм слоя в год.

Обычно для расчетов  $K_n$  используются среднегодовые значения как подземного стока, рассчитанного тем или иным способом, так и атмосферных осадков. Поэтому величина  $K_n$  отражает некоторое усредненное для лет различной водности соотношение осадков и стока, хотя достаточно тесных корреляционных связей между хронологическими ве-

личинами этих процессов во многих случаях нет. Тем не менее, поскольку такое среднестатистическое соотношение стока и осадков существует и является показательным, величины коэффициентов подземного стока могут использоваться для прогнозов. Так, задавшись прогнозируемым изменением атмосферных осадков, используя формулу 8.1., можно получить прогнозное значение подземного стока ( $Q = P_{пр} \cdot K_n / 100\%$ ). Условием применимости такого, в определенной мере, воднобалансового подхода является несущественность (не более  $\pm 10\%$ ) отклонений прогнозируемых осадков от их среднееголетней нормы, т.е. когда соотношение осадков и подземного стока близко к фактически наблюдавшимся средним многолетним, и поэтому коэффициент подземного стока может быть принят для прогноза равным среднееголетнему. Подобные прогнозные оценки могут осуществляться как для отдельных водосборов, так и в среднем по выделенным гидрогеологическим районам, где условия формирования подземного стока идентичны и поэтому разброс коэффициентов подземного стока по различным водосборам в пределах района не велик.

Выполнявшиеся нами ранее прогнозные оценки [34], показали, что на первом прогнозируемом этапе изменений климата (к 2000 г.) на большей части страны не произойдет более существенных изменений в осадках, что позволяет использовать данный подход в прогнозах.

При более значительных климатических изменениях, прогнозируемых на последующих этапах, приводящих к отклонениям атмосферных осадков от их среднееголетних норм свыше  $10\%$ , использование среднееголетнего коэффициента подземного стока для таких оценок становится недопустимым, т.к. в годы высокой и низкой водности соотношение осадков и подземного стока может существенно в 1,5–2 раза измениться [26].

Как уже указывалось выше, вклад сезонных атмосферных осадков в формирование уровней и расходов подземных вод того же года или амплитуд их колебаний не велик.

Физически это легко объяснить. Скорости фильтрации подземных вод составляют максимум несколько сантиметров в сутки, а во многих случаях и значительно меньше. В итоге время фильтрации от водораздела до реки измеряется не редко многими годами и поэтому уровни подземных вод определяются интегральными осадками за серию лет.

Корреляционный анализ рядов уровней подземных вод с последовательно суммируемыми осадками за 1, 2, 3 и т.д. лет показывает, что коэффициенты корреляции сначала растут, достигая максимума, а затем постепенно уменьшаются. Экстремум такой кривой, определяющий ха-

ракторное для водосбора число лет, осадки которых целесообразно учитывать в прогнозах, достигает чаще всего 3–5 лет. Однако реальное количество лет, определивших положение уровней в многолетнем разрезе, значительно больше. Это явление и определяет физическую обоснованность возможности использования коэффициента подземного стока, оцененного по среднемноголетним осадкам и стоку.

Прогнозные осадки при прогнозах климата, как уже отмечалось, не являются строго календарными и к ним следует относиться как к возможной изменчивости среднемноголетних атмосферных осадков за какой-то промежуток времени в будущем. Такие же изменения группировок лет с осадками ниже и выше многолетних норм определили группировки или годы соответственно высокой и низкой водности в подземном стоке. Исходя из такого физически обоснованного допущения можно признать возможность коррелирования обеспеченностей атмосферных осадков и подземного стока и на этой основе построить графики зависимости среднегодовых или гарантированных меженных модулей подземного стока от степени водности года, выраженную в процентах обеспеченностей (рис.8.1).

Выполненный анализ таких графиков по ряду водосборов ЕТС показал, что в маловодные годы, особенно в серии маловодных лет, коэффициент подземного стока в среднем в два раза ниже среднемноголетнего, а в году высокой водности наоборот в среднем в 1,5 раза больше (см. рис.8.1а). В различных климатических зонах это соотношение несколько изменяется и обычно растет в направлении с севера на юг.

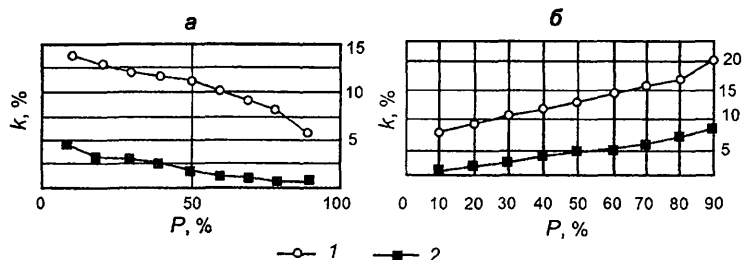


Рис. 8.1. Графики зависимости среднегодовых (а) и меженных (б) коэффициентов подземного стока ( $k$ , %) от степени водности года ( $P$ , %)

1 - среднегодовой коэффициент подземного стока; 2 - меженное значение коэффициента подземного стока

По ряду других водосборов зависимость величин коэффициентов подземного стока от степени водности года, оцениваемой по атмосферным осадкам, бывает иногда обратной, т.е. коэффициенты стока уменьшаются при увеличении процента обеспеченности осадков (см. рис.8.1б). При этом во всех случаях с увеличением атмосферных осадков питание подземных вод возрастает. Однако доля участия атмосферных осадков в этом питании как видно из рисунка 8.1 может либо расти, либо наоборот сокращаться. Причины этого явления в должной мере пока не изучены. Возможно это связано с особенностями строения зоны аэрации и степенью расчлененности рельефа, что определяет различную степень изменчивости соотношения коэффициента вариации ( $C_v$ ) подземного стока по сравнению с таковым в атмосферных осадках. Так, замечено, что при соотношении коэффициентов вариации подземного стока и атмосферных осадков более двух чаще всего отмечается прямая зависимость коэффициента подземного стока от осадков, а при этом соотношении менее 2 – обратная. Поэтому подобные зависимости должны устанавливаться отдельно для каждой водосборной площади или гидрогеологического района.

Несмотря на свою простоту этот способ прогнозных оценок подземного стока может быть вполне оправданным. Это определяется его физической обоснованностью и решающим вкладом в формирование подземного стока именно атмосферных осадков. Уровень и достоверность такого прогноза возможно несколько не ниже достоверности исходных климатологических прогнозов и поэтому такие прогнозы вполне могут быть использованы для экспертного плана прогнозных оценок, осуществляемых в региональном плане.

Выраженная в миллиметрах слоя разность между полученным по уравнению 8.1 прогнозным и современным среднеголетним стоком характеризует прогнозное изменение питания подземных вод в среднем для водосбора. Допустив, что это питание будет равномерно распределено по всей площади изучаемого водосбора и разделив эту разность на характерные для водосбора средние коэффициенты водоотдачи или недостатки насыщения пород в зоне прогнозируемых изменений уровней грунтовых вод, можно получить представления и о возможных также средних для водосбора изменениях глубин залегания грунтовых вод при соответствующих изменениях климата:

$$\Delta h = \Delta Q/\mu, \quad (8.2)$$

### 8.2.2. Прогнозы, основанные на многофакторных связях (множественной корреляции)

Как известно, инфильтрационное питание подземных вод, обуславливающее подземный сток, определяется не только атмосферными осадками. Так, на величину инфильтрационного питания подземных вод в большинстве случаев влияет не годовая величина осадков, а главным образом количество осадков холодного периода. При этом существенное значение имеет не только их абсолютная величина, но и интенсивность их выпадения, определяющая соотношение расходования осадков на впитывание в почву и на склоновый сток, и долю осадков, участвующих в питании подземных вод. Немаловажным фактором является степень влагонасыщенности зоны аэрации в моменты питания подземных вод, степень промороженности зоны аэрации к началу снеготаяния, дружность весны, дефицит влажности и температура воздуха, определяющие испарение, количество и продолжительность оттепелей за зиму, характер внутригодового распределения осадков и эвапотранспирации, водохозяйственная деятельность на водосборе и др. Получить такую информацию в полном объеме для региональных оценок с использованием детальных балансовых расчетов и моделей и тем более на прогнозном отрезке времени практически невозможно. Таких данных не содержат и климатологические прогнозы. Поэтому для прогнозов вероятной изменчивости подземного стока в пределах большей части водосборов страны может быть использовано лишь ограниченное количество доступной метеорологической и гидрологической информации. В том числе могут быть использованы главным образом лишь данные по суммарным осадкам за год для отдельных сценариев климата, а также по температурам воздуха, также за год и реже по периодам года. Лимитирующим таким образом при выборе предикторов является условие наличия соответствующих прогнозов в рамках климатологических прогнозов по используемым сценариям изменения климата.

Прогнозы на многофакторной основе могут быть осуществлены прежде всего с применением хорошо разработанной в математической статистике множественной линейной корреляции. Прогнозное уравнение при этом, как известно, представляется в виде:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_i x_i \quad (8.3)$$

где  $y$  – прогнозируемая величина меженного или годового подземного стока по выбранным характерным водосборным бассейнам;  $x_1, \dots, x_i$  – фак-

торы, участвующие в прогнозе (осадки, температура и др.);  $a_0, a_1, \dots, a_i$  – коэффициенты уравнения.

Близким по физическому смыслу к данному методу являются методы «черного ящика» и весовых функций. Для линейных систем расчетное уравнение может быть представлено в виде интеграла Дюамеля:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \int_{T_n} W_i(\tau) \cdot X_i(t - \tau) \cdot d\tau, \quad (8.4)$$

где  $X_1, \dots, X_i$  – режимобразующие факторы и их весовые функции  $W_i(\sigma)$ . ...  $W_{ij}(\sigma)$  отражающие вклад каждого из них в выходную величину ( $Y$ );  $T_n$  – память системы по каждому входу.

Методология, техника реализации и оценка достоверности и качества таких прогнозов, включая специфику гидрогеологических прогнозов, достаточно подробно рассматривались и широко апробировались ранее [21, 22, 23].

Основной проблемой в данном направлении прогнозирования является обоснование выбора физически значимых и достаточных для прогнозов предикторов. Эта задача связывается прежде всего с оценкой и учетом степени инерционности или «памяти» водоносных горизонтов на метеообстановку прошлого для каждого конкретного в отдельности водосбора, т.е. с учетом его геологического строения. Оценить интегрирующую способность уровней подземных вод и подземного стока на конкретных водосборах, отражать увлажненность какой-то серии предыдущих лет можно различными способами и, в том числе, отмеченной выше корреляцией величин подземного стока с последовательно суммируемыми за 2, 3 и т.д. предыдущих лет или со сглаженными по  $n$ -леткам осадками (годовыми или «эффективными» – зимними). Аналогичный прием может быть использован и для оценки «памяти» системы по связям подземного стока с атмосферной циркуляцией, т.е. при помощи кросскорреляционного анализа рядов подземного стока и атмосферной циркуляции. Примеры таких оценок приведены в работах [26–29].

Комплексный анализ «памяти» водоносных систем показывает, что в большинстве случаев на характер режима подземного стока наиболее существенно влияет метеообстановка чаще всего 2 реже 3 предыдущих лет. Весовой вклад в формирование подземного стока метеоусловий более ранней предыстории довольно быстро затухает, что позволяет ограничить поиск прогностических связей в зависимости от размера водосбора и его геологического строения именно в пределах 1–3 предыдущих лет.

Для получения расчетного уравнения (8.3) выбираются чаще всего следующие, имеющиеся в наличии факторы:  $x_1$  – осадки,  $x_2$  – температура,  $x_3$  – испарение и  $x_4$  – данные об уровнях или подземном стоке на период составления прогноза. Выбор данных по этим факторам осуществляется предварительными вариантными расчетами парных корреляционных связей этих факторов и прогнозируемой величины ( $y$ ). В качестве таких вариантов используются значения различных сумм годовых осадков, температур или испарения, сумм осадков за холодный период, температур или испарения за теплый период, а также суммы каждого из этих факторов за один, два или три года. В расчетное уравнение включаются лишь 2–3 фактора, с которыми получены наиболее высокие и статистически значимые значения парных корреляционных связей.

Прогнозы по многофакторным связям могут осуществляться по отдельным водосборным бассейнам при наличии данных о подземном стоке по анализируемому замыкающему створу и метеоданных в пределах этого водосбора, а также по отдельным скважинам для прогноза уровней в них. Результаты таких частных прогнозных оценок могут затем усредняться в пределах гидрогеологического района.

Оценка достоверности прогнозов или вернее качества прогностического уравнения при решении подобных задач может быть осуществлена лишь на основании эпигнозных расчетов. При этом могут быть использованы различные критерии достоверности прогнозов, в том числе:

1) по статистической значимости коэффициентов корреляции [22], характеризующей реальность устанавливаемых связей, оцениваемой по таблицам в зависимости от длины исходного ряда наблюдений и числа участвовавших в расчете факторов,

2) по соотношению ошибок прогноза с среднеквадратическим отклонением:

$$S_y / \sigma_y < 0,7-0,8, \quad (8.5)$$

3) по соотношению коэффициентов корреляции и их ошибок:

$$\mu = R / \sigma_R = \frac{|R| \sqrt{n-1}}{1-R^2} \geq 3, \quad (8.6)$$

4) по соотношению ошибки прогноза с допустимой:  $S_y \leq \Delta_{\text{доп}}$ , где  $\Delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_y$



### 8.2.3. Прогнозы по моделям с сосредоточенными параметрами

Прогнозы, основанные на моделях с сосредоточенными параметрами или танковых моделях, строятся на водном балансе водосбора в целом. Под сосредоточенностью параметров понимается их пространственное усреднение по водосбору, т.е. принимается условно однородными геологическое и почвенное строение бассейна, фильтрационные свойства пород, равномерность выпадения атмосферных осадков по площади, их инфильтрации и испарения, равномерность изменения геологических запасов подземных вод по площади. Вполне очевидно, что подобные допущения даже для водосбора небольшой площади, делают модель весьма обобщенной. Однако такой подход может рассматриваться возможным и применимым для водосборов различной площади, принимая во внимание, что выходной расчетной составляющей баланса является подземный сток с водосбора в целом, расчленить который на составляющие, формирующиеся в различных частях бассейна с различными гидрогеологическими условиями, не всегда представляется возможным из-за отсутствия достоверной информации. Аргументом приемлемости такого подхода служит сравнительная стабильность основных режимобразующих условий на водосборе в процессе длительных наблюдений за изменениями водного баланса, т.е. неизменность на срок заблаговременности прогноза геологического строения и ландшафтных условий (почв, растительность и др.). Это позволяет калибровать модель только по изменяющимся во времени режимобразующим факторам, определяющим структуру водного баланса и получать в итоге приемлемые для прогнозных оценок результаты.

Воднобалансовое уравнение неразрывности для замкнутого водосбора, как известно, записывается в виде:

$$Q_e = (P - E) \cdot \beta \pm \Delta h \mu, \quad (8.7)$$

где  $Q_e$  – меженный среднемесячный расход реки, определяемый разгрузкой подземных вод (зимний или летний при отсутствии осадков);  $P$  – атмосферные осадки;  $E$  – испарение;  $\Delta h$  – изменение уровней грунтовых вод на водосборе;  $\mu$  – водоотдача пород;  $\beta$  – калибровочный коэффициент.

Размерность всех величин в мм слоя воды.

Калибровка модели начинается с определения средней для водосбора величины водоотдачи. Для этого по периоду независимого спада расходов реки с интервалом в  $\Delta t$  определяется объем осушенной части водоносного горизонта ( $\Delta h \cdot F$ ), где  $F$  – площадь водосбора.  $Q_i$  – объем сдвиги-

рованных за это же время подземных вод, оцениваемый по стоку реки в это время. В итоге водоотдача пород на водосборе в среднем определяется по формуле:

$$\mu = \frac{\Delta Q \cdot \Delta t}{\Delta h \cdot F}, \quad (8.8)$$

Расчет проводится по нескольким периодам независимого спада за разные годы, после чего выбирается среднее используемое в прогнозах значение  $\mu$ . Затем по имеющемуся ряду многолетних наблюдений проводится определение калибровочного коэффициента для каждого года в отдельности:

$$\beta_i = \frac{Q_i \pm \Delta h_i \cdot \mu}{P_i - E_i}, \quad (8.9)$$

В связи с тем, что данная модель используется для оценок возможной изменчивости подземного стока или ресурсов подземных вод под влиянием техногенных изменений климата, для расчетов используются прогнозируемые климатологами изменения осадков, испарения и температуры для соответствующего водосбора. Прогноз осуществляется по уравнению (8.7).

Учитывая то, что величина калибровочного коэффициента ( $\beta$ ) существенно и нелинейно (рис.8.2) зависит от эффективных осадков ( $P-E$ ), значение  $\beta$  лучше всего снимать с эмпирического графика  $\beta = f(P-E)$ .

В тех случаях, когда испарение не прогнозируется, оно может быть рассчитано по известным эмпирическим зависимостям Тюрка, Ольдекопа, Шнайдера и др. по прогнозным значениям температур и осадков или через прогнозируемую испаряемость.

На основе моделей с сосредоточенными параметрами могут быть оценены и усредненные величины изменений уровней грунтовых вод при прогнозируемых эффективных осадках. Для этого используется зависимость сформированных на водосборе запасов влаги в стационарных условиях от эффективных осадков [68]

$$W = \frac{\bar{P}}{\alpha} = \frac{\bar{V}}{\alpha}, \quad (8.10)$$

где  $W$  – запас влаги на водосборе или средний «рабочий» объем водосбора, участвующий в формировании подземного стока, т.е. объем подземных вод, располагающийся выше базиса дренирования (реки).

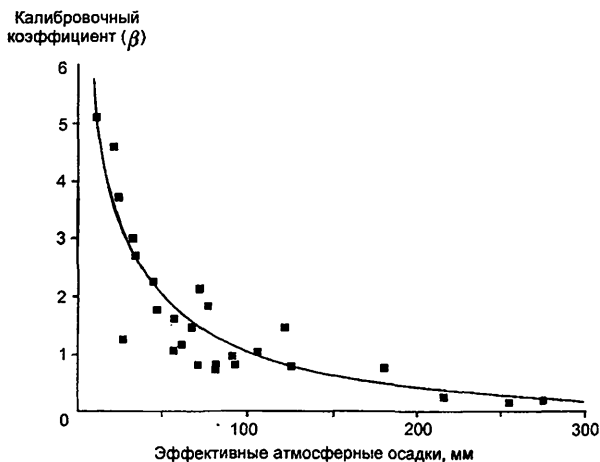


Рис. 8.2. Зависимость калибровочного коэффициента ( $\beta$ ) от величины эффективных атмосферных осадков ( $P-E$ )

$\bar{P}$  — объем среднемноголетних осадков на водосборе, численно равный разности осадков и испарения и соответственно среднемноголетнему стоку в замыкающем створе ( $\bar{V}$ );  $\alpha$  — параметр инерционности водосбора, равный

$$\alpha = \frac{1 - \lambda}{\lambda}, \quad (8.11)$$

где  $\lambda$  — коэффициент автокорреляции поверхностного стока. Определив последний и задавшись прогнозными изменениями эффективных осадков по тому или иному сценарию изменений климата, а также зная площадь водосбора и усредненные водоотдачу или недостаток насыщения пород в зоне аэрации, не трудно рассчитать возможное изменение уровней грунтовых вод на водосборе.

Прогнозные оценки подземного стока в связи с трансформациями климата с использованием данной модели могут осуществляться в различных вариантах:

1) Расчет баланса по уравнению 8.7 осуществляется для поверхностного стока, а затем, используя полученный по многолетним наблю-

дениям коэффициент подземного питания рек  $\alpha = \frac{Q_n}{Q_p}$ , где  $Q_n$  – годовой

подземный сток и  $Q_p$  – годовой речной сток, получается искомая величина подземного стока.

2) Расчет баланса по уравнению 8.7 осуществляется для меженного зимнего подземного стока и затем, используя региональный коэффициент соотношения меженного и годового подземного стока, рассчитывается последний. Для расчетов по данному варианту используются среднемесячные меженные зимние значения речного стока, изменения запасов подземных вод на этот же период, а также годовые значения осадков и испарения за гидрологический год.

Точность подобных экспертных прогнозных оценок вполне соответствует точности климатологических прогнозов.

В связи с тем, что прогнозное изменение подземного стока, как было показано выше, соответствует и определено изменившимся питанием подземных вод на водосборе, по нему можно оценить и среднее по водо-

сбору возможное изменение уровней грунтовых вод ( $\Delta h_{mm} = \frac{\Delta Q_{mm}}{\mu}$ ). При

этом можно принять значения водоотдачи для наиболее характерного песчанистого и супесчано-суглинистого строения зоны аэрации равным, соответственно 0,1 и 0,05.

#### 8.2.4. Прогнозы на основе экстраполяции трендов

Все рассмотренные выше методы прогнозов подземного стока основывались на нахождении взаимосвязей между меняющимися климатическими характеристиками и подземным стоком с последующими прогнозами последнего по прогнозам первых. Положительной стороной таких прогнозов является их физическая основа. Недостатком же таких прогнозов является то, что они даются, как уже отмечалось выше, по прогнозным климатическим данным. При этом, если доверительный интервал ошибок прогнозных оценок любых природных процессов, и особенно связанных с метеорологией, вообще обычно довольно широк, то точность прогноза по прогнозу тем более не может быть высокой. Все это обязывает выполнять прогнозные оценки по возможности различными способами и еще лучше – не взаимосвязанными путями.

Один из таких вариантов прогнозирования может основываться на выделении и экстраполяции линейных или нелинейных трендов. Физическим обоснованием к использованию данного способа прогноза может служить тот факт, что техногенные трансформации климата (как один из вариантов причин этих изменений) начались не сегодня, а связаны с предшествующим постепенным накоплением углекислоты и других парниковых газов в атмосфере в течение нескольких последних десятилетий, а наиболее интенсивно с середины пятидесятих годов, что и определило появление таких трендов. Направленность геологических процессов, как другой возможной причины климатических изменений, так же характеризуется, как правило, еще большей временной протяженностью. Поэтому, если допустить, что тот или иной процесс уже реально в природе существует и его воздействие на климатические характеристики уже проявились, опираясь на мнение большинства климатологов, то соответствующие изменения по изложенным выше причинам должны неизбежно проявиться и в подземных водах. Это и подтверждается отмеченными выше данными наблюдений [34]. Более того, если исходный фактор, накопление углекислоты в атмосфере, имеет на данном этапе характер близкий к линейному и также экстраполируется в будущее, то можно ожидать аналогично близкие к линейным изменения и в подземном стоке.

Линейные тренды могут быть выделены регрессионным анализом хронологических рядов значений подземного стока с порядковыми номерами их членов, т.е. в их зависимости от времени. Экстраполяция таких трендов может осуществляться по полученным уравнениям регрессии при условии, что усредненный за многолетие процесс изменчивости питания подземных вод, т.е. «темп тренда», сохранится таким же и в будущем, как он был зафиксирован к настоящему моменту времени. Следует подчеркнуть, что в большинстве фактических рядов наблюдений за подземным стоком такие тренды, как было показано выше, действительно вскрываются и в большей своей части вполне могут аппроксимироваться линейными трендами. В ряде случаев темпы трендов существенно увеличиваются в последние десятилетия [34]. Причины такого явления пока не изучены. Возможно, это определяется инерционностью гидрогеологической системы, под влиянием которой начавшиеся ранее климатические изменения, проявились в ней с различным запаздыванием. Более вероятным представляется то, что причиной этого эффекта служит хозяйственная и прежде всего водохозяйственная деятельность людей на водосборной площади в результате чего, как было показано выше, в таких трендах сложились одновременно воздействия как климатических изменений, так и различных других техногенных нагрузок на подземную

гидросферу. В этих случаях возможно появление и нелинейных трендов. Выделение последних может осуществляться различными способами сглаживания, в том числе полиномами различных степеней, рядами Фурье и др. Наиболее простым и удобным способом сглаживания являются полиномы вида:

$$Q(t) = a_0 + a_1 t_1 + a_2 t_2 + \dots + a_m t_m, \quad (8.12)$$

Как показал опыт [23], в большинстве случаев для этих целей достаточно использовать полиномы третьей, реже четвертой степени, обеспечивающих вполне приемлемую аппроксимацию многолетней изменчивости динамической средней подземного стока. Вполне естественно, что наиболее достоверные прогнозы многолетней направленности в режиме и ресурсах подземных вод можно получить лишь на ближайшие годы при условии, что характер прогнозных трендов, полученных по другим методам для более отдаленных этапов климатических прогнозов, совпадают по знаку. Экстраполяция таких трендов в сравнительно отдаленное будущее может осуществляться лишь графически экспертным путем, т.к. расчет по полученным уравнениям полиномов может дать при различных степенях полиномов абсолютно нереальную картину, вплоть до противоположной направленности процесса в будущем.

Выделение и экстраполяция линейных и нелинейных трендов может осуществляться отдельно для межennaleго и годового подземного стока. Возможную дисперсию сезонных и многолетних колебаний расходов подземного стока относительно выделенных трендов можно смоделировать методом Монте-Карло. Допустимость такого прогноза определяется сравнительно не большими пока темпами трендов, что позволяет принять относительную неизменность статистических параметров и закона распределения стоковых характеристик на прогнозный период. Там же, где такое допущение сомнительно, необходим дополнительный анализ временных рядов с прогнозной оценкой возможной изменчивости статистических параметров в будущем.

### **8.3. Оценка воздействий изменения климата на ресурсы подземных вод Московской области**

Оценка этих изменений для Московского региона особенно важна, так как в силу его высокой урбанизированности и напряженности водного баланса любые нарушения гидрогеологических и взаимосвязанных

с ними инженерно-геологических условий могут иметь существенное практическое, в том числе экологическое, значение. что обязывает знать, а следовательно прогнозировать такие изменения. В основу таких прогнозов положены разработанные ГГИ сценарии изменения климата. а также изложенные выше адаптированные методы прогнозов режима в качестве основы прогнозируемых ресурсов подземных вод применительно к решению данной задачи. В качестве основы прогнозируемых ресурсов подземных вод рассматривался имеющий наибольшее практическое значение и достоверность меженный зимний подземный сток, фиксируемый реальными гидрологическими изменениями и характеризующий минимальные естественные ресурсы подземных вод.

Как известно, глобальное потепление климата, судя по палеоклиматическим реконструкциям, приводит к увеличению разности между осадками и испаряемостью в северных и гумидных частях земного шара и наоборот, к преобладанию испаряемости над осадками в аридных зонах Земли, увеличивая тем самым соответственно степень гумидизации климата в первых и аридизации климата во вторых частях. Московский регион располагается вблизи границы раздела двух этих зон, в зоне увеличения гумидизации климата. Поэтому каких-либо значительных и тем более катастрофических климатических изменений, связанных с климатом, здесь можно не ожидать. Тем не менее, прогнозируемое для этого региона увеличение атмосферных осадков примерно на 100 мм/год и 100–150 мм/год (при глобальном потеплении климата соответственно на 2 и 3–4°C) может составить около 15–25% приходной части водного баланса региона. Подобные изменения ожидаются уже во втором-третьем десятилетии начавшегося века. Анализ многолетних рядов за подземным стоком по всем существующим 34 гидропостам, сравнительно равномерно распределенным по территории Московской области, показал наличие повсеместного положительного тренда. Тенденции к увеличению подземного стока определяются градиентами трендов от 0,02 до 0,17, в среднем 0,08 л/сек·км<sup>2</sup> в год. Установленные тенденции могут служить косвенным доказательством влияния начавшихся климатических изменений на ресурсы подземных вод и обоснованием целесообразности прогнозов таких изменений в будущем, что может представить определенный практический интерес.

Следует отметить, что в связи с существующими на сегодня экономическими трудностями прогнозы базировались на имеющихся данных материалов наблюдений по поверхностному и подземному стоку до 1995 г., а по атмосферным осадкам вообще до 1990 г. В этой связи интерес представлял прогноз на 2000 г., что можно было бы практически уже

проверять и тем самым глобально оценить степень влияния первого этапа климатологического прогноза (при потеплении на  $1^{\circ}\text{C}$ ).

Учитывая сравнительно не высокую заблаговременность, для такого прогноза использовался метод экстраполяции выделенных трендов. Так, как уже отмечалось выше, средний градиент тренда в атмосферных осадках составил  $4\text{ мм/год}$ , что позволяет оценить увеличение средних осадков в регионе к 2000 г., на  $40\text{ мм/год}$  больше по сравнению с данными десятилетней давности.

Средний темп трендов меженного зимнего подземного стока, по региону в целом, определяемого изменениями атмосферных осадков, как было показано выше, составил  $0,017\text{ л/сек}\cdot\text{км}^3$  в год. Исходя из этого естественный прирост модулей подземного стока за период с 1995 г. на реках с ненарушенным режимом должен составить к 2000 г. в среднем по региону на  $0,085\text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$  или округленно на  $0,1\text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$ .

На реках с сильно нарушенным режимом поверхностного стока градиенты трендов возрастают по сравнению с естественными условиями более чем на порядок, в среднем до  $0,15\text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$  в год. Это может увеличить модули подземного стока на некоторых реках к 2000 г. при суммарном воздействии естественных и техногенных факторов на  $0,7\text{--}0,8\text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$ , естественно, если наблюдаемые темпы трендов сохраняются. Тем не менее, используя установленные тренды и экстраполируя их до 2000 г., были получены возможные модули меженного подземного стока, по каждому из изученных водосборов. Результаты этих оценок представлены в таблице 8.1.

Как видно из данной таблицы, на реках со слабо нарушенным режимом стока модули к 2000 г. должны возрасти на  $0,3\text{--}1,5\text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$  в среднем около  $0,9\text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$  по сравнению со среднемноголетними модулями подземного стока, оцененными по всему периоду наблюдений и характерными для семидесятых годов. На реках с сильно нарушенным режимом подземного стока такой прогноз по отдельным водосборам не проводился, т.к. его результаты нельзя сопоставлять с соответствующим изменением питания подземных вод. Так, по ряду водосборов такие модули могли бы возрасти к 2000 г. до  $6\text{--}7\text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$ , что является аномальным для относительно естественных условий региона, отвечающим только техногенным условиям.

Таким образом к 2000 г. меженные зимние модули подземного стока должны возрасти в среднем по области с  $2,0$  до  $2,7\text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$ , т.е. почти в  $1,3$  раза по сравнению со среднемноголетними. Однако по сравнению с модулями меженного подземного стока последних 10 лет эти изменения уже не так существенны – всего на  $0,07\text{--}0,5$ , чаще на  $0,15\text{--}0,2\text{ л/сек}\cdot\text{км}^2$



**Прогноз изменений модулей подземного стока на 2000 г.**

| Гидрогеологический район | Название реки, поста | Расход межени в 2000 г., м³/сек | Площадь водосбора | Модуль 50%, л/сек·км² | Тренд л/сек·км² год | Мод |
|--------------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|-----|
|                          |                      |                                 |                   |                       |                     |     |
| I                        | 43                   | 2,85                            | 1320              | 1,44                  | 0,038               |     |
|                          |                      |                                 |                   |                       |                     |     |
| II                       | 44                   | 3,5                             | 1340              | 1,79                  | 0,027               |     |
|                          | 237                  | 2,1                             | 255               | 2                     | 0,066               |     |
|                          | 247                  | 0,45                            | 170               | 1,76                  | 0,05                |     |
|                          | 248                  |                                 | 472               |                       | 0,046               |     |
|                          | 249                  |                                 | 339               |                       |                     |     |
| III                      | 46                   | 8                               | 2100              | 2                     | 0,076               |     |
|                          | 49                   | 4,4                             | 1160              | 3,5                   | 0,043               |     |
|                          | 230                  | 3,5                             | 935               | 3,3                   | 0,04                |     |
|                          | 238                  | 8                               | 1380              |                       | 0,002               |     |
|                          |                      |                                 |                   |                       |                     |     |
|                          | 257                  | 0,25                            | 70,5              | 3,1                   | 0,07                |     |
|                          | 252                  | 0,22                            | 91,2              | 1,43                  | 0,054               |     |
|                          | 253                  |                                 | 364               |                       | 0,026               |     |
|                          | 259                  | 1,35                            | 280               | 3,64                  | 0,1                 |     |
|                          | 258                  | 1,05                            | 291               | 2,6                   | 0,048               |     |
|                          | 240                  | 44                              | 5000              |                       | 0,17                |     |
|                          | 241                  |                                 | 7320              |                       | 0,18                |     |
|                          | 256                  | 11,5                            | 1950              |                       | 0,15                |     |

таблица 8.1

| Гидрогеологический район | Название реки, поста                 | Расход межени в 2000 г., м³/сек | Площадь водосбора | Модуль 50%, л/сек·км² | Тренд л/сек·км² год | Мод |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|-----|
| III                      | 265 р. Медвенка – д. Большое Сареево | 0,08                            | 21,5              | 2,2                   | 0,047               |     |
|                          | 268 р. Зака – д. Большое Сареево     | 0,12                            | 17                |                       | 1,3                 |     |
|                          | 343 р. Клязьма – с. Павловский Посад |                                 | 4550              | 4,4                   | 0,16                |     |
|                          | 353 р. Киржач – д. Барскова          | 4,2                             | 1380              | 2,9                   | 0,018               |     |
|                          | 351 р. Воря – д. Мишнево             | 6,5                             | 947               |                       | 0,13                |     |
| IV                       | 352 р. Серая – д. Новинки            |                                 | 293               | 3,2                   | 0,1                 |     |
|                          | 232 р. Нара – г. Наро-Фоминск        | 2                               | 665               | 2,11                  | 0,056               |     |
|                          | 233 р. Нара – д. Папино              |                                 | 971               | 1,91                  | 0,045               |     |
|                          | 278 р. Пахра – д. Макарово           | 6,1                             | 1760              | 1,59                  | 0,11                |     |
|                          | 282 р. Северка – с. Покровское       | 2,45                            | 792               | 2,15                  | 0,09                |     |
| V                        | 280 р. Нерская – г. Куровское        | 1,8                             | 612               | 1,6                   | 0,098               |     |
|                          | 283 р. Цна – с. Старый Спас          |                                 |                   |                       |                     |     |
|                          | 297 р. Пра – с. Деулино              | 10,5                            | 4170              | 1,34                  | 0,032               |     |
| VI                       | 236 р. Осетр – д. Маркино            | 7,3                             | 3020              | 1,7                   | 0,023               |     |
|                          | 235 р. Осетр – д. Хруשובка           |                                 | 462               |                       |                     |     |
|                          | 229 р. Таруса – д. Похвиснево        |                                 | 872               |                       | 0,09                |     |

больше современных, что сопоставимо с оценкой возможного прироста стока, рассчитанного обобщенно по приросту осадков. Некоторое превышение этого прироста стока над вероятным естественным свидетельствует о наличии вклада техногенного фактора. Количественно этот вклад сопоставим по масштабам с естественным и лишь несколько превышает последний. Все это позволяет относить данные водосборы к слабо нарушенному, а не чисто естественному режиму.

Прогнозы, основанные на экстраполяции трендов, предусматривают неизбежные отклонения годовых значений стока на прогнозном отрезке как в одну, так и в другую сторону в зависимости от особенностей метеорологической обстановки каждого года в отдельности. Поэтому оценка оправдываемости таких прогнозов может осуществляться лишь по выдержанности темпов трендов на прогнозном отрезке времени. Отклонения отдельных годовых значений стока не должны выходить за пределы среднеквадратического отклонения по прогнозной выборке.

Для прогнозов подземного стока на более отдаленные периоды, соответствующие потеплению климата на 2 и 3–4°C, использовались обоснованные выше зависимости изменений коэффициентов и модулей подземного стока от степени водности года, выраженной в процентах обеспеченности атмосферных осадков. Для этого по каждому из водосборов были установлены такие зависимости, два примера из которых приведены в таблице 8.2.

Как видно из данных таблиц, модули и коэффициенты подземного стока с ростом атмосферных осадков возрастают и могут увеличиться на данных водосборах в 1,5–3 раза, что подтверждается фактическими наблюдениями. Поэтому задавшись прогнозными атмосферными осадками либо прямо с таких таблиц, либо по графикам зависимости, построенным на основе этих таблиц, снимаются прогнозные значения модулей и коэффициентов подземного стока, соответствующие прогнозным осадкам. Как уже указывалось на период потепления на 2°C, что ожидается примерно в 2020 г., для прогноза использовались данные ГГИ, определяющие возможное к этому времени увеличение атмосферных осадков в данном регионе на 100 мм/год (прогноз на 2020 г.).

В приведенных примерах среднемноголетние осадки таким образом должны возрасти с 569 до 669 мм/год, т.е. примерно до современных значений осадков 20% обеспеченности. В соответствии с этим условием модуль подземного стока, как видно из таблиц, в бассейне р. Осетр может возрасти с 1,69 до 2,45 л/сек·км<sup>2</sup>, т.е. на 0,77 л/сек·км<sup>2</sup>, а в бассейне р. Нерская на 1,37 л/сек·км<sup>2</sup>. Аналогичным образом были составлены прогнозы и по всем остальным водосборам. Еще раз необходимо подчеркнуть,

Таблица 8.2а

**Зависимости коэффициентов и модулей меженного зимнего подземного стока  
от степени водности года (по атмосферным осадкам)**

| р. Осетр, д. Маркино. Площадь водосбора (F) – 3020 км <sup>2</sup> |                                  |                                      |                                                            |                                        |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Обеспеченность,<br>%                                               | Меженные<br>расходы,<br>(Q), л/с | Атмосферные<br>осадки (E),<br>мм/год | Модули<br>подземного стока<br>(Q/P), л/сек·км <sup>2</sup> | Коэффициенты<br>подземного<br>стока, % |
| 5                                                                  | 10300                            | 764                                  | 3,58                                                       | 14,7                                   |
| 10                                                                 | 9000                             | 718                                  | 2,98                                                       | 13,0                                   |
| 20                                                                 | 7400                             | 661                                  | 2,45                                                       | 11,6                                   |
| 30                                                                 | 6200                             | 643                                  | 2,05                                                       | 10,0                                   |
| 40                                                                 | 5600                             | 626                                  | 1,85                                                       | 9,4                                    |
| 50                                                                 | 5100                             | 5,69                                 | 1,69                                                       | 9,3                                    |
| 60                                                                 | 4600                             | 540                                  | 1,52                                                       | 8,8                                    |
| 70                                                                 | 4300                             | 517                                  | 1,42                                                       | 8,7                                    |
| 80                                                                 | 4000                             | 483                                  | 1,32                                                       | 8,6                                    |
| 90                                                                 | 3400                             | 437                                  | 1,13                                                       | 8,1                                    |
| 95                                                                 | 3000                             | 408                                  | 0,99                                                       | 7,6                                    |

таблица 8.2б

| р. Нерская. Куровское. Площадь водосбора (F) – 612 км <sup>2</sup> |                                     |                                           |                            |                                              |                                                |                                                 |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Обеспеченность,<br>%                                               | Меженные<br>расходы,<br>Q,<br>л/сек | Модули<br>подземного<br>стока,            |                            | Атмо-<br>сферные<br>осадки<br>(P),<br>мм/год | Эффек-<br>тивные<br>осадки<br>(P-E),<br>мм/год | Коэффи-<br>циенты<br>подземного<br>стока*,<br>% |
|                                                                    |                                     | M <sub>1</sub> ,<br>л/сек·км <sup>2</sup> | M <sub>2</sub> ,<br>мм/год |                                              |                                                |                                                 |
| 5                                                                  | 3500                                | 5,72                                      | 182,07                     | 764                                          | 330                                            | 26                                              |
| 10                                                                 | 2560                                | 4,18                                      | 131,67                     | 718                                          | 240                                            | 18,3                                            |
| 20                                                                 | 1800                                | 2,94                                      | 92,6                       | 661                                          | 225                                            | 14                                              |
| 30                                                                 | 1420                                | 2,32                                      | 73                         | 643                                          | 180                                            | 11,3                                            |
| 40                                                                 | 1150                                | 1,88                                      | 59,3                       | 626                                          | 150                                            | 9,4                                             |
| 50                                                                 | 960                                 | 1,57                                      | 49,45                      | 569                                          | 130                                            | 8,6                                             |
| 60                                                                 | 820                                 | 1,34                                      | 42,2                       | 540                                          | 115                                            | 7,8                                             |
| 70                                                                 | 670                                 | 1,09                                      | 34,3                       | 517                                          | 80                                             | 6,6                                             |
| 80                                                                 | 550                                 | 0,9                                       | 28,3                       | 483                                          | 25                                             | 5,8                                             |
| 90                                                                 | 450                                 | 0,74                                      | 23,3                       | 437                                          | -10                                            | 5,2                                             |
| 95                                                                 | 340                                 | 0,56                                      | 17,6                       | 408                                          | -30                                            | 4,2                                             |

\* коэффициенты подземного стока – ( $K = M_2/P$ )

что точность таких прогнозов невелика и к ним следует относиться лишь как к порядку возможных изменений в будущем.

При наличии прогнозируемых изменений испарения аналогичные таблицы могут быть построены уже относительно эффективных осадков. Значения коэффициентов подземного стока по отношению к эффективным осадкам будут уже другими, существенно отличающимися от обычно картируемых современных среднесноголетних значений коэффициентов стока. Вместе с тем такой подход более полно учитывает влия-

ние изменений составляющих водного баланса на прогнозируемые естественные ресурсы подземных вод.

Как видно из таблицы 8.26, эффективные осадки особенно в годы низкой водности (90–95% обеспеченности) становятся отрицательными. Это означает, что в такие годы не только все атмосферные осадки расходуются на испарение (в среднемноголетнем разрезе водного баланса), но и, более того, отмечается истощение накопленных ранее запасов влаги из почв, зоны аэрации, грунтовых вод и болот. Сокращается также расходование влаги на транспирацию растениями. В такие годы отмечается снижение уровней грунтовых вод, хотя подземный сток, как видно из таблиц, сохраняется, осуществляясь, главным образом, за счет сработки запасов подземных вод и частичного их питания в периоды, когда испарение было ниже осадков (весна, поздняя осень). Коэффициенты подземного стока в таких ситуациях становятся по своему физическому смыслу весьма условными.

Для прогноза вероятных изменений подземного стока к середине столетия использовалось прогнозное по сценарию ГТИ увеличение осадков на 150 мм/год (по сравнению с среднемноголетним современным).

Результаты всех прогнозных оценок, усредненных по гидрогеологическим районам приведены в таблице 8.3.

Как видно из данной таблицы, предстоящие изменения климата приведут к увеличению питания подземных вод в регионе. И если в начале века модули меженного подземного стока возрастут на 30–35% по сравнению с современными среднемноголетними, что практически уже наблюдается, то при потеплении на 2°C (т.е. примерно к 2020 г.) модули и соответственно естественные ресурсы подземных вод могут возрасти уже

Таблица 8.3

**Прогнозные изменения меженных зимних модулей подземного стока  
Московского региона**

| Гидро-<br>геологический<br>район | Модули подземного стока, л/сек·км <sup>2</sup> |            |         |         |
|----------------------------------|------------------------------------------------|------------|---------|---------|
|                                  | современный<br>50% обеспечен.                  | прогнозные |         |         |
|                                  |                                                | 2000 г.    | 2020 г. | 2050 г. |
| <b>I</b>                         | 1,62                                           | 2,38       | 2,7     | 3,05    |
| <b>II</b>                        | 1,92                                           | 2,53       | 3,2     | 4,03    |
| <b>III</b>                       | 3,36                                           | 3,57       | 3,9     | 4,7     |
| <b>IV</b>                        | 1,94                                           | 2,8        | 2,9     | 3,5     |
| <b>V</b>                         | 1,47                                           | 2,71       | 2,9     | 3,8     |
| <b>VI</b>                        | 1,7                                            | 2,4        | 2,5     | 2,9     |
| <b>В среднем<br/>по области</b>  | 2,0                                            | 2,7        | 3,0     | 3,6     |

в 1,5 раза. Среднегодовые значения модулей и расходов подземных вод в среднем по региону будут в 1,35 раза выше меженных зимних.

Следует еще раз подчеркнуть, что достоверность данных прогнозов прямо зависит от достоверности климатологических прогнозов, что может быть проверено лишь со временем. В данный момент к этим прогнозам можно относиться лишь как к порядку величин возможных изменений ресурсов подземных вод в будущем.

Прогнозируемое увеличение ресурсов подземных вод, с одной стороны, улучшит условия водоснабжения региона, повысит меженные расходы рек и оздоровит их экологическую обстановку. С другой стороны, повышение питания подземных вод приведет к подъему уровней грунтовых вод к середине столетия на 40–60 см в характерных для региона песчаных отложениях и до 0,8–1,2 м в супесчано-суглинистых отложениях, слагающих зону аэрации. Это увеличит степень подтопленности ряда городов области (в том числе и Москвы), активизирует оползневую деятельность, карстовые процессы, заболачивание низинных территорий. Все это обязывает сосредоточить внимание на прогнозы этих негативных последствий в связи с предстоящими изменениями климата.

---

---

## *Глава 9*

# **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ МАЛЫХ НЕЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ ВОДОСБОРОВ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА СЧЕТ КОМБИНИРОВАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Все реки Московского региона за исключением Волги и Оки могут быть отнесены к категории малых рек. Все возможные к использованию на сегодня водные ресурсы Волги до 82 м<sup>3</sup>/сек (что в 2,5 раза больше естественного расхода реки в межень) аккумулируются в Иваньковском водохранилище и подаются по каналу в Москву. Все допустимые к использованию водные ресурсы р. Оки планируется перехватить Приокским месторождением подземных вод. Поэтому повышение водообеспеченности Московского региона на перспективу при неизбежном росте в будущем населения, промышленности, повышения продуктивности животноводства и сельскохозяйственного производства станет возможным либо за счет создания новых водохранилищ (на Оке, на Волге у Ржева и других малых реках), либо за счет перебросок стока с удаленных территорий (например, трубопроводом из Рыбинского водохранилища), либо за счет более рационального и даже оптимального использования местных водных ресурсов и прежде всего подземных вод. Экономическая и экологическая предпочтительность последнего варианта очевидна, что уже обосновывалось выше (см. гл. 5). Создание мощных централизованных водозаборов на напорные воды с неизбежным ущербом меженному речному стоку здесь не рассматривается.

Само понятие «малые реки» весьма условно. Дать какое-либо универсальное и тем более количественное определение этому понятию сложно и может даже невозможно. Все зависит от цели анализа или сравнения различных характеристик рек (их протяженности, площадей водосбора, расходов, глубины, степени дренирования подземных вод и т.д.). Поэтому применительно к рассматриваемой проблеме, т.е. с водохозяйственных позиций под малой рекой следовало бы понимать реку с меженными расходами, соизмеримыми с потребностью в воде на данной территории. Для неурбанизированных территорий с преимущественным сельским населением и небольшими поселками городского типа, а также с малыми городами с водозаборами до 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут, то есть около 1 м<sup>3</sup>/сек, к малым рекам, как уже указывалось, могут быть отнесены реки с меженными расходами до 1–1,5 м<sup>3</sup>/сек. С увеличением потенциальной потребности в воде на водосборе и при наличии в нем нескольких малых городов, к числу малых могут быть отнесены реки уже с меженными расходами свыше 2 м<sup>3</sup>/сек и более.

Перспективных для целей централизованного водоснабжения рек на территории области с потенциальными эксплуатационными ресурсами поверхностных и подземных вод свыше 1 м<sup>3</sup>/сек при условии сохранения экологического стока достаточно много – свыше двух десятков.

Наиболее перспективной для организации водоснабжения с комбинированным использованием поверхностных и подземных вод является северная и северо-западная части области. Здесь развиты малые реки со среднегодовыми расходами от 2–4 до 8–11 м<sup>3</sup>/сек и модулями поверхностных и подземных вод соответственно 5–12 и 1,8–3,5 л/с·км<sup>2</sup>.

Реки региона относятся к типу снегового питания, при котором основная часть поверхностного стока (до 50–60 и более процентов) проходит за краткий (1–1,5 месяца) паводковый период. Маловодная часть года в годы различной водности составляет до 280–310 суток. Расходы рек в эти периоды измеряются лишь первыми кубометрами в секунду. Поэтому, если задаться сохранением минимального санитарного стока в межень хотя бы в 1 м<sup>3</sup>/сек, то станет очевидным, что перспективы использования поверхностных вод со стабильным круглогодичным многолетним отбором невелики.

По условиям формирования меженного стока все эти реки можно разделить на незарегулированные, режим которых в большей мере определяется природными факторами, и зарегулированные, режим которых в значительной мере нарушен и даже в той или иной мере управляется. В данной главе мы остановимся только на незарегулированных реках. Незарегулированные реки, в свою очередь, могут быть подразделены на



реки со слабо нарушенным и существенно нарушенным режимом. Условной границей между ними могут служить, как было показано выше, градиенты трендов меженного стока (до 0,05 л/сек·км<sup>2</sup> в год и свыше 0,05 до 0,1 л/сек·км<sup>2</sup> в год).

Градиенты трендов слабонарушенных рек определяются главным образом градиентами трендов атмосферных осадков, а также увеличением подземного стока за счет рассредоточенной эксплуатации глубоких водоносных горизонтов на поливы, мелиорацией земель, утечек из водонесущих коммуникаций и т.п.

Градиенты трендов расходов существенно нарушенных незарегулированных рек определяются главным образом за счет наращивания перевода части эксплуатируемых и использованных подземных вод глубоких водоносных горизонтов в подземный сток зоны активного водообмена, а также за счет увеличения с ростом водопотребления сброса возвратных эксплуатируемых централизованными водозаборами подземных вод непосредственно в реки. Поэтому четкими хотя и косвенными критериями степени нарушенности меженного стока рек могут служить наличие на водосборе централизованных водозаборов, суммарная их производительность и объемы неиспользованных вод, сбрасываемых в реки, а также степень урбанизированности территорий.

Как также было показано выше (см. гл. 4) в малых незарегулированных реках региона со слабо нарушенным режимом за счет комбинированного использования поверхностных и подземных вод можно увеличить восполняемые эксплуатационные ресурсы подземных вод в 3–5 раз, что позволяет обеспечить хозяйственно-питьевой водой малые и средние города с населением до 100 тысяч и даже более. Методология оценок и обоснования возможного повышения водообеспеченности таких водосборов была также рассмотрена выше. В этой связи здесь следует остановиться в основном на особенностях наращивания допустимого водоотбора в долинах с относительно нарушенным режимом. В качестве таковых целесообразно рассмотреть некоторые водосборы севера области, планируемые для создания централизованных водозаборов. Их перспективность определяется нахождением за пределами Московской региональной воронки депрессии, а также значительно меньшей индустриализацией и урбанизацией территории по сравнению с югом области и соответственно меньшей освоенностью водных ресурсов. Один из таких водосборов приурочен к долине р. Дубны, которой разведан один из наиболее крупных водозаборов для централизованного водоснабжения как Москвы, так и ряде малых городов северо-востока области (Химки, Лобня, Шереметьево (аэропорт), Сергиев Посад и др.).

Наблюдения в бассейне Дубны ведутся по посту Вербилки с 1966 г., который может характеризовать подземный сток и общие водные ресурсы на водосборе как самой Дубны, так и ее притока Вели, в пределах которых и запроектированы водозаборы с суммарной производительностью до 5,3 м<sup>3</sup>/сек. При этом Среднедубнинский, Вельский и Нижневельский участки данной водозаборной системы располагаются выше поста Вербилки и лишь Нижнедубнинский – ниже от этого поста.

Всего по предварительным оценкам по Дубненскому месторождению планируется отбирать 300 тыс. м<sup>3</sup>/сут, а по Вельскому – 160 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в сумме 460 тыс. м<sup>3</sup>/сут или 5,3 м<sup>3</sup>/сек при понижениях в эксплуатируемых водоносных горизонтах до 70–88 м.

Хронологические графики меженных зимних и абсолютных минимальных среднемесячных годовых значений стока 95% обеспеченности свидетельствуют о явной нарушенности подземного стока. При этом визуально появление положительных трендов можно было бы отметить примерно с 1972 г. (рис.9.1). Однако по двойным интегральным кривым р. Дубны и р. Катыш четкое отклонение расходов реки Дубны от региональной естественной нормы начинается с 1981 г. (рис.9.2). О естественности изменений стока р. Катыш, как аналога свидетельствует его идентичность со стоком р. Москвы на посту Барсуки (см. рис.9.2), расположенном в самом верховье реки со слабо хозяйственно освоенным водосбором.

Если не учитывать нарушенность режима, то в этом варианте минимальный среднемесячный годовой расход р. Дубны 95% обеспеченности можно было бы оценить по периоду с 1961 по 1981 гг. всего в 1,5 л<sup>3</sup>/сек. Тогда по аналогии с незарегулированными малыми реками потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод, тесно связанных с поверхностным стоком, могут составить лишь 0,3 м<sup>3</sup>/сек, а экологический сток должен сохраняться в размере 1,2 м<sup>3</sup>/сек.

Анализ наиболее маловодной серии, отмеченной по посту Вербилки за период 1964–1970 гг., показал, что постоянно возобновляемые потенциальные эксплуатационные ресурсы могут быть увеличены здесь в 5 раз, т.е. до 1,5 м<sup>3</sup>/сек. В этом случае в многоводные периоды с расходами реки свыше 2,7 м<sup>3</sup>/сек такая вода может забираться прямо из реки или перехватываться инфильтрационным водозабором. При расходах ниже 2,7 м<sup>3</sup>/сек должен включаться компенсационный водозабор для погашения возникающих при этом дефицитов поверхностного стока.

Как видно из графика данной маловодной серии (рис.9.3) максимальная продолжительность дефицитного периода в стоке может составить 5 месяцев при среднем дефиците стока за это время в 0,75 м<sup>3</sup>/сек. Во всех

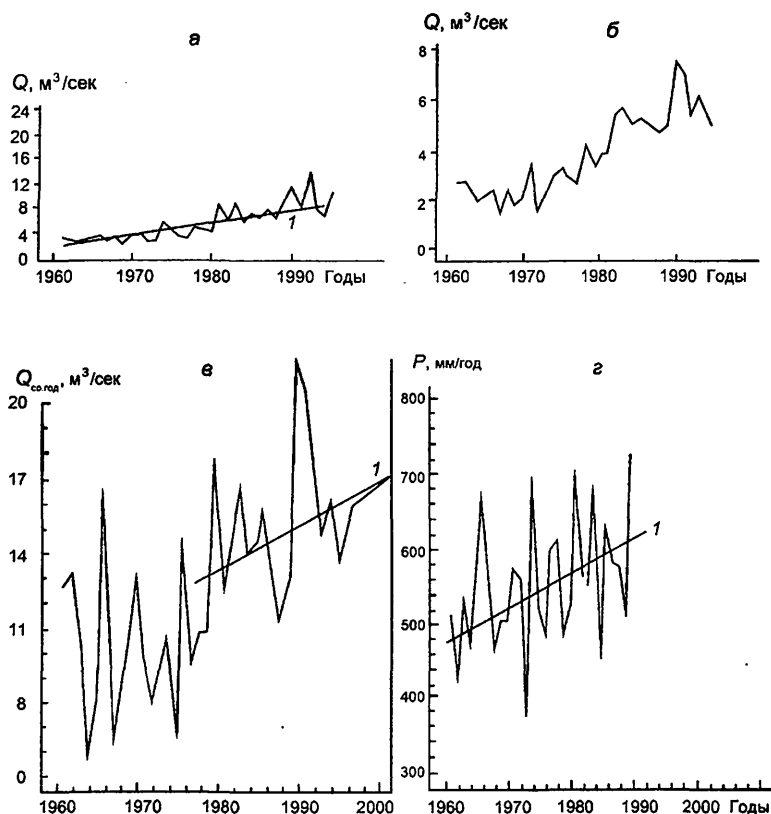


Рис. 9.1. Хронологические графики меженных зимних (а), минимальных среднемесячных 95% обеспеченности (б) и среднегодовых расходов (в) реки Дубны (п. Вербилки), а также среднегодовых атмосферных осадков по г. Дмитрову (г)

1 – тренды

остальных случаях продолжительность дефицитных периодов и среднемесячный дефицит будут меньше, лишь в 1969 г. в течение 3 месяцев пришлось бы включать водозабор с средней производительностью в  $1,03 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Основными продуктивными водоносными горизонтами в данном районе являются турабьевский, кутузовско-ногинский и подольско-мячковский, изолированные сверху юрскими глинами и перекрытые межморенным и надморенным водоносными горизонтами. Все это предопреде-

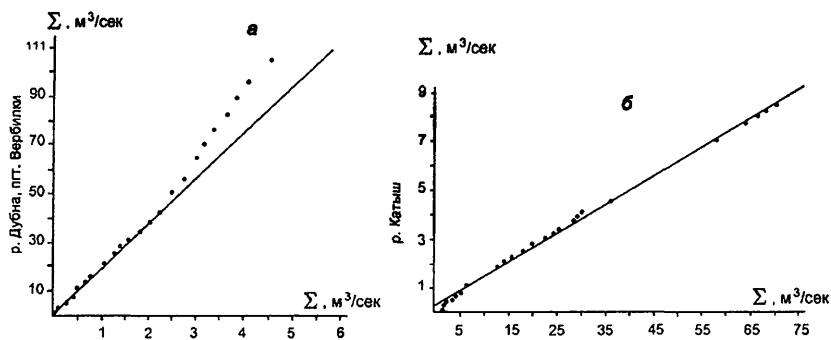


Рис. 9.2. Двойные интегральные графики расходов рек Дубна и Катыш (а), а также рек Катыш и Москва, Барсуки (б)

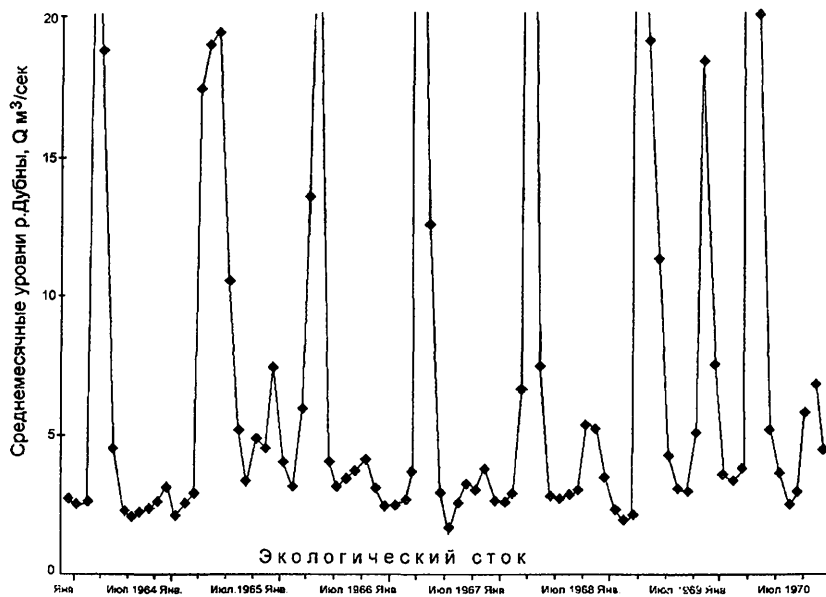


Рис. 9.3. Хронологический график поверхностного стока р. Дубна за период 1964–1970 г. (по среднемесячным данным)

ляет надежную изолированность эксплуатируемых слоев от поверхностного стока с отсутствием сколько-нибудь заметного ущерба стоку при кратковременной (до 5 месяцев) эксплуатации. Проектную среднемноголетнюю производительность водозабора можно было бы и увеличить. Однако при этом продолжительность дефицитных периодов возрастут свыше 6 месяцев, что создает негарантированность восполнения сработанных запасов до очередного маловодного периода, который (чего нельзя исключать) может появляться ежегодно.

При суммарной водопроводимости всех трех основных водоносных горизонтов  $km = 3000 \text{ м}^3/\text{сут}$ , пьезопроводности обобщенного пласта в  $10^6 \text{ м}^3/\text{сут}$ , допустимом понижении 70 м, а также задавшись радиусом «большого колодца» линейного водозабора с  $R_0 = 1000 \text{ м}$ , можно получить для условий неограниченного напорного пласта производительность компенсационного водозабора в следующих цифрах (табл. 9.1).

Следует отметить, что принципиальная возможность отбора до  $12 \text{ м}^3/\text{сек}$  из подземных вод в бассейне Дубны для покрытия дефицитов Ивановского водохранилища отмечалась и ранее [9]. Однако условия отбора (водоносные горизонты, допустимая периодичность, гарантированность восполнения и др.) не были охарактеризованы.

Данный расчет показывает значительно большие (в 5 раз) возможности водоносных слоев в погашении дефицитов стока по сравнению с возникающими в естественном стоке дефицитами (в  $0,75 \text{ м}^3/\text{сек}$  в течение 5 месяцев или  $1,03 \text{ м}^3/\text{сек}$  в течение 3 месяцев). Прерывистость работы водозабора с перерывами равными и тем более превышающими продолжительность водоотбора, делают систему с практически возобновляемыми водными ресурсами, обеспечивающую неограниченное во времени их использование и главное – полное отсутствие каких-либо негативных экологических последствий. Кроме того такой водозабор может быть намного более компактным и тем самым более экономичным.

Таблица 9.1

**Зависимость производительности компенсационного водозабора от продолжительности водоотбора**

| Продолжительность водоотбора, сут | Производительность водоотбора средняя |                         |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
|                                   | тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$          | $\text{м}^3/\text{сек}$ |
| 30                                | 628,0                                 | 7,3                     |
| 90                                | 497,6                                 | 5,8                     |
| 150                               | 453,1                                 | 5,3                     |
| 180                               | 439,6                                 | 5,1                     |
| 300                               | 405,8                                 | 4,7                     |

Вместе с тем, природные условия формирования стока в бассейне р. Дубны уже давно нарушены и приведенный выше пример представляет лишь теоретический интерес. Как видно из рисунка 9.1 сток в бассейне с 80-х годов имеет явную тенденцию к росту. Наиболее реальной причиной этому, как было обосновано выше, помимо климатических изменений, является сброс в реки и грунтовые воды возвратных вод. В бассейне Дубны сооружены несколько водозаборов, в том числе в Запрудне с производительностью 17 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в Вербилках – 3 тыс. м<sup>3</sup>/сут, Красногорске – 25,4 тыс. м<sup>3</sup>/сут, Муханов – 4,1 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Всего отбирается только из учитываемых водозаборов не менее 49,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут или около 0,57 м<sup>3</sup>/сек. По-видимому, не меньший вклад имеют и многочисленные рассредоточенные мелкие водозаборы и одиночные эксплуатационные скважины в поселках и садовых участках.

Определенную роль в увеличении поверхностного стока сыграла мелиорация Верхне-Волжской низины. При этом обычно отмечается увеличение поверхностного стока и снижение меженного речного или подземного стока, наиболее четко проявляющееся в первые годы после проведения мелиоративных работ, после чего отмечается стабилизация водного баланса.

Однако только постепенным наращиванием водоотбора и соответственно количества возвратных вод трудно объяснить рост стока с средним многолетним градиентом тренда до 0,07 л/сек·км<sup>2</sup> в год.

Интересно сопоставить измерения средних значений меженного зимнего и среднегодового поверхностного стока за периоды до появления отчетливого тренда (1980 г.) и после этого (табл.9.2)

Как видно, и зимний, и среднегодовой сток за последние годы возросли соответственно на 3,9 и 4,4 м<sup>3</sup>/сек.

Сопоставимость меженного и среднегодового прироста стока свидетельствует о едином и практически круглогодичном факторе его вызывающем, что подтверждает вывод о решающей роли в этом возвратных вод. Вместе с тем объяснить такой прирост в полном объеме только воз-

Таблица 9.2

Зависимость средних значений стока от периода осреднений

| Период осреднений | Количество лет | Меженный зимний сток, м <sup>3</sup> /сек | Среднегодовой сток, м <sup>3</sup> /сек |
|-------------------|----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1961–1980         | 20             | 2,9                                       | 10,6                                    |
| 1981–1995         | 15             | 6,8                                       | 15,0                                    |
| Разность          |                | 3,9                                       | 4,4                                     |
| 1961–1995         | 35             | 4,6                                       | 12,5                                    |

вратными водами с водозаборов, расположенных непосредственно в пределах водосбора Дубны и ее притоков, трудно. Поэтому возможно в водосбор Дубны попадают возвратные воды из Сергиева Посада (Загорска) и Хотьково, располагающихся на границе водосборов рек Дубны и Вори. Суммарный водоотбор этими городами достигает 136 тыс. м<sup>3</sup>/сут или 1,58 м<sup>3</sup>/сек. Прирост подземного стока за счет увеличения количества атмосферных осадков за последние 15 лет с градиентом до 4 мм/год мог составить со всего водосбора максимум около 0,75 л/сек·км<sup>2</sup> или около 1,5 м<sup>3</sup>/сек, т.е. менее 50% от фактического прироста стока. Таким образом фактический прирост стока в бассейне Дубны до поста Вербилки можно следующим образом разделить на составляющие: 1,5 м<sup>3</sup>/сек – за счет прироста атмосферных осадков, 0,5 м<sup>3</sup>/сек – возвратные воды централизованных водосборов в бассейне (с учетом безвозвратных потерь) и около 1,5 м<sup>3</sup>/сек – возвратные воды от неучтенных источников рассредоточенного водоотбора и возможно от водозаборов Сергиева Посада (Загорска) и Хотьково.

Методология учета трендов в гидрогеологических расчетах пока не является устоявшейся и достаточно апробированной. Один из вариантов такого учета рассматривался нами ранее [31] применительно к долине р. Дубны. Основная сложность такой оценки связана с отсутствием методологии прогноза внутригодового режима стока в условиях нестационарности.

Решение данной задачи может быть сведено к выделению тренда и анализу нового реконструированного ряда или смоделированного ряда применительно к принятой схеме возможного формирования стока.

Так, по имеющимся на момент выполнявшихся ранее таких оценок по данным о стоке до 1988 г. из всего ряда наблюдений было осуществлено выделение тренда. По полученному новому реконструированному ряду (в отклонениях от тренда) был построен график обеспеченности, на основании которого реконструированный ряд был расчленен значениями различной обеспеченности (рис.9.4).

На полученном графике, в частности, видно, что при планировании среднегодового водоотбора, равного 95 и 90% обеспеченности расходов реки могут проявиться лишь по два маловодных периода продолжительностью в 1 год. При водоотборе, равном 80% обеспеченности, маловодных серий, равных 1 году, будет уже 5, а при 70% обеспеченности появляется уже серия различных маловодных периодов: один, равный году, три – равные 2 годам и 1, равный трем годам. При этом не всегда после каждой маловодной серии появляется многоводная, большая по продолжительности и объемам предыдущей маловодной. Таким образом, по дан-

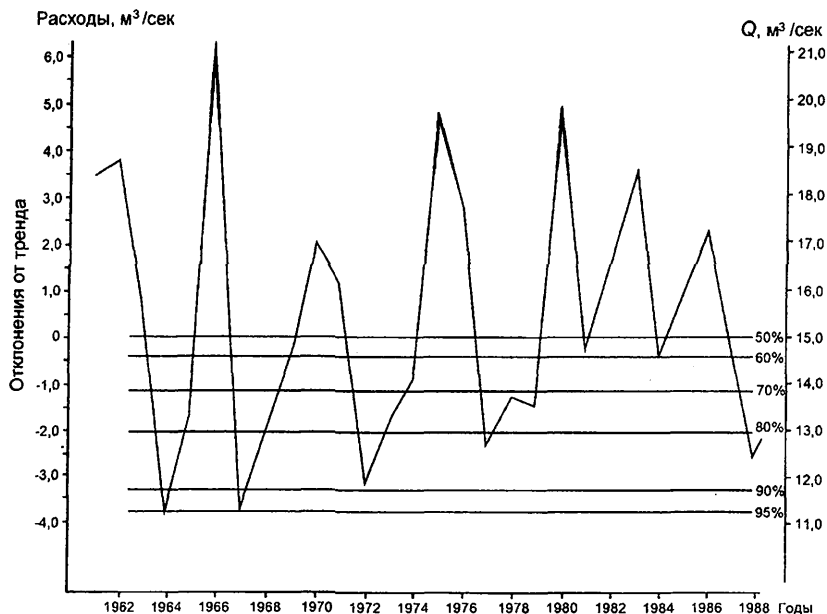


Рис. 9.4. Реконструированный ряд колебаний среднегодового стока р. Дубны

ному эмпирическому ряду можно заключить, что оптимальной расчетной обеспеченностью планируемого среднегодового водоотбора из поверхностных вод может быть признана 80% с расходом стока  $13 \text{ м}^3/\text{сек}$ . При этом за прогнозный период эксплуатации (25 лет) может в этом случае проявиться 5 годичных маловодных периодов, после каждого из которых во всех случаях последуют более многоводные серии и по продолжительности и по объемам стока, способные компенсировать возникшие в маловодье дефициты.

Возможные дефициты стока могут быть сняты прямо с графика или взяты из таблиц. Так, в данном примере максимальный дефицит может составить  $1,7 \text{ м}^3/\text{сек}$  в течение года. В реальных условиях продолжительность дефицитного периода будет несколько меньше, около 10 месяцев. Оценить продолжительности внутригодовых маловодных периодов можно по вероятностным графикам, построенным в процентах обеспеченность по среднемесячным значениям стока.

При аналогичных параметрах прогнозного водозабора подобный дефицит стока может быть восполнен при понижении всего в  $12,8 \text{ м}$ , т.е.



с большим запасом. С такой производительностью водозабор мог бы работать свыше 5 лет, т.е. даже если все маловодные серии сгруппируются подряд, то водозабор сможет обеспечить покрытие таких дефицитов.

Абсолютные значения среднегодового водоотбора 80% и любой другой обеспеченности могут быть получены также по графику рисунка 9.4, построив в том же масштабе параллельную шкалу справа, совместив среднемноголетнее значение (50%) среднегодового стока с нулем отклонений от тренда. Однако выбор среднемноголетнего среднегодового значения стока должен быть предварительно обоснован и выбран с учетом возможной многолетней изменчивости стока. При этом могут быть рассмотрены различные варианты или сценарии (рис.9.5). В том числе в качестве среднемноголетнего среднегодового стока может быть принято а) его фактическое значение по всему ряду без учета тренда ( $12,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ ), б) средний сток за период проявившегося тренда, т.е. за 1981–1995 гг. –  $15,0 \text{ м}^3/\text{сек}$ , в) сток по значению тренда на последний год наблюдений ( $16 \text{ м}^3/\text{сек}$ ) или г) прогнозный по тренду средний сток на 2000 г. –  $17 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Каждый из этих вариантов может быть физически обоснован и следовательно признан приемлемым и вполне реальным.

В первом случае, рассматриваемый ряд несмотря на тренд принимается стационарным с длиннопериодными колебаниями вокруг установленного среднего многолетнего. Данный же рост расходов реки может рассматриваться нахождением периода наблюдений на ветви подъема, после которого неизбежно наступит соответствующее понижение расходов реки.

Во втором случае, так же как и во всех последующих, признается нестационарность процесса с участием в формировании стока воздействий изменений климата и техногенных факторов. При этом во втором случае принимается уже зафиксированная средняя величина стока, в третьем –

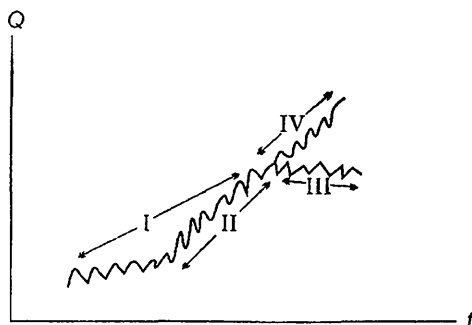


Рис. 9.5. Возможные варианты оценок среднемноголетнего стока

I–IV – сценарии развития процесса многолетней изменчивости стока в будущем

достигнутая максимальная средняя величина стока с предположением, что дальнейшие изменения в климате и в наращивании водоотбора будут несущественными и процесс формирования стока будет испытывать стабилизацию, как многие процессы в природе. И наконец последний вариант предусматривает продолжение изменений климата и увеличение питания подземных вод, о чем утверждают климатологи, а также продолжение наращивания водоотбора из глубоких горизонтов с установившимися на сегодня темпами.

Нереальность первого варианта обосновалась ниже. Он может рассматриваться лишь как самый жесткий. Все остальные варианты вполне реальны. Наиболее жестким из них является второй, который и принят нами в качестве «рабочего», подтвержденного фактическими наблюдениями. При этом варианте среднегодовой водоотбор, соответствующий 80% обеспеченности стока реки, может максимально составить  $13 \text{ м}^3/\text{сут}$  (см. рис.9.4). Таким образом с учетом требуемого сохранения экологического стока в межень в  $1,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ , то из системы можно отбирать  $11,8 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Такой водоотбор может осуществляться круглогодично либо прямо из реки, либо инфильтрационным водозабором во время многоводных лет. В маловодные годы водоотбор из реки в течение 10 месяцев должен сокращаться максимум на  $1,7 \text{ м}^3/\text{сек}$ , т.е. до максимально возможного среднегодового дефицита, с одновременным включением компенсационного водозабора с производительностью, равной расходу возникшего дефицита стока.

Аналогичную и даже более жесткую оценку возможного водоотбора в бассейне р. Дубны можно сделать не по хронологическому, а смоделированному методом Монте-Карло ряду. Для этого, используя реконструированный ряд определяются требуемые для моделирования его статистические параметры ( $\bar{Q}$ ,  $\sigma$ ,  $C_v$ ,  $R_v$ ), а также установленный логарифмически-нормальный закон распределения.

Как уже отмечалось ранее [31], важным здесь является выбор создающего определенную гарантированность результата прогнозного ряда или выборки из прогнозной генеральной совокупности. Это определяется тем обстоятельством, что моделирование случайного процесса предусматривает неоднозначность используемых для расчетов и оценок выборок. Выше уже отмечалось, что смоделировав ряд длиной в 1000 лет и сравнив нарезанные из него выборки по 25 лет, как возможных прогнозных рядов стока для оценок запасов подземных вод, можно убедиться, что все они окажутся разными. Выполненный анализ показал, что наихудшим из таких рядов может быть тот, при котором случайно сгруппирует-

ся наибольшее количество маловодных серий. Среднеголетнее значение такого выборочного ряда оказывается естественно также ниже среднего по сравнению со средней генеральной совокупности. Для решения этой задачи [30] разработана специальная программа моделирования рядов заданной обеспеченности их среднего значения при любых законах распределения и любой степени взаимосвязанности членов ряда. Используя эту программу, смоделирован ряд стока р. Дубны для его среднего значения 80%обеспеченности при следующих исходных параметрах:  $\bar{Q} = 13,0 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $C_v = 0,28$ ;  $R_i = 0,1$ , длина прогнозного ряда 25 лет; закон распределения выборочных значений логнормальный. Прогнозный ряд представлен на рисунке 9.6. Разбивка такого ряда по градациям степени водности, выраженной в процентах обеспеченности, позволяет выбрать значения среднегодовых расходов реки заданной оптимальной расчетной обеспеченности. Принимая во внимание то, что в основу расчетов целесообразно поставить значения расходов, равных или близких к таковым для оптимальной обеспеченности с маловодными сериями, не превышающими года, оптимальным расходом, определяющим возможный среднегодовой отбор воды, принят расход 80% обеспеченности, равный

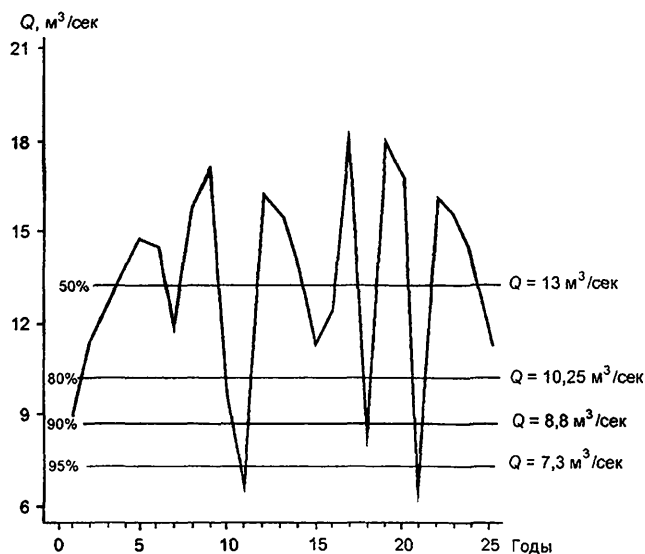


Рис. 9.6. Смоделированный прогнозный ряд

8,8 м<sup>3</sup>/сек. Дефицитными при этом за расчетный период могут оказаться лишь три года с максимальным дефицитом стока до 2,3 м<sup>3</sup>/сек в течение 10 месяцев. С учетом сохранения экологического стока в межень круглогодичный водоотбор из реки или путем перехвата стока инфильтрационным водозабором может составить 7,6 м<sup>3</sup>/сек с сокращением отбора на 2,3 м<sup>3</sup>/сек в маловодные годы и включением на это время компенсационного водозабора. Возможности водоносных горизонтов, как уже указывалось выше, с гарантией способны покрыть подобные дефициты, даже если две маловодные серии сгруппируются подряд.

Однако и этот вариант оценки допустимого водоотбора представляет главным образом методологический интерес, как пример способа расчетов в условиях четко выраженного тренда. В тех же случаях, когда тренд не очень существенен, оценка дефицитов стока и возможного среднемноголетнего водоотбора по среднегодовым значениям стока, как это было сделано выше, может существенно зависеть возможности водоотбора из системы. Это связано с тем, что в отдельные маловодные годы могут создаваться аномально низкие расходы стока и соответственно образовываться значительные дефициты. В этом случае обязательным должен быть анализ многолетней изменчивости стока с учетом закономерностей внутригодового его режима, т.е. по среднемесячным данным.

Анализ внутригодовой изменчивости стока реки Дубны за период с 1982 г., т.е. с момента его нарушения и изменений среднемноголетней нормы, показал возможность среднемноголетнего водоотбора в пределах от 5,3 до 6,3 м<sup>3</sup>/сек (рис.9.7). Первая цифра (5,3 м<sup>3</sup>/сек) была выбрана для анализа с целью определения возможности обеспечить водоотбор, соответствующий суммарной проектной производительности разведенных в бассейне Дубны и Вели водозаборов. С учетом экологического стока среднегодовой расход реки в этом случае должен быть не менее 6,5 м<sup>3</sup>/сек. Как видно из графика (см. рис.9.7) продолжительность дефицитных периодов не превышает 6 месяцев. Такой наиболее маловодной серией оказался летне-зимний период 1988–1989 гг. Преобладающие дефицитные периоды имеют продолжительность 2–3 месяца. Максимально возможный среднемесячный дефицит стока может составить 1,1 м<sup>3</sup>/сек, т.е. более чем в 4 раза меньше возможности компенсационного водозабора в пределах соответствующей по продолжительности маловодной серии.

Второй вариант возможного водоотбора в 6,3 м<sup>3</sup>/сек выбран с целью обоснования допустимого наращивания водоотбора без существенного увеличения продолжительности маловодной серии. Как видно из того же рисунка, увеличение водоотбора и соответственно среднего дефицита

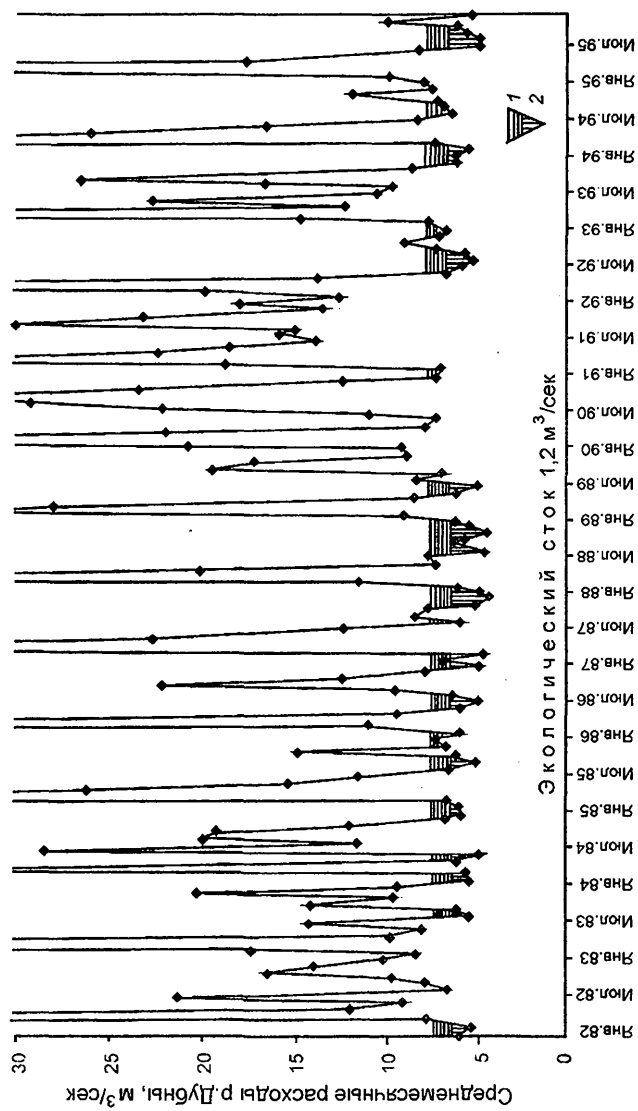


Рис. 9.7. Хронологический график расхода р. Дубны за период с 1982 по 1995 гг.  
 1 – дефициты стока при отборе 5,3 м³/сек, 2 – дефициты стока при отборе 6,3 м³/сек

стока на  $1 \text{ м}^3/\text{сек}$  не увеличивает продолжительности серии сверх допустимой (6 мес.). Дефицит стока ( $2,1 \text{ м}^3/\text{сек}$ ) при этом по-прежнему остается в 2 раза меньшим возможностей компенсационного водозабора (см. табл.9.1). При первом варианте водоотбора компенсационный водозабор потребовалось бы включать практически ежегодно, за исключением двух лет из 14, а при втором варианте – ежегодно, а в отдельные годы даже по два раза – в зимнюю и летнюю межень. В этом случае важным становится, чтобы суммарная продолжительность работы компенсационного водозабора в среднем за многолетие не превысила 50% рассматриваемого многолетнего периода. В этом случае можно гарантировать восстановление напора, даже если в отдельные годы очередное снижение уровней начнется при недовосстановленных напорах. Мощным фактором, способствующим восстановлению напоров, будут служить ежегодные паводки, разделяющие дефицитные периоды.

Прогнозный гидрограф стока в условиях работы системы легко представить, если совместить на графике 9.7 прямую расчетного стока, равного  $7,5 \text{ м}^3/\text{сек}$  (при отборе в  $6,3 \text{ м}^3/\text{сек}$ ), с прямой экологического стока, равного  $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

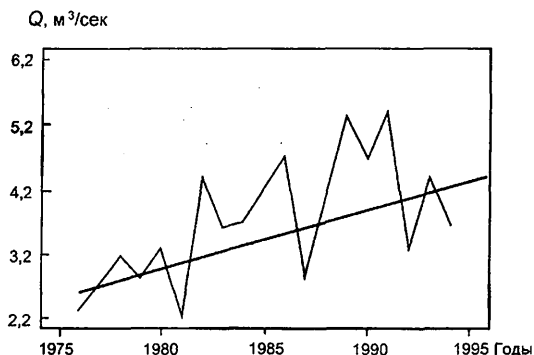
Как показало моделирование работы всей группы взаимодействующих водозаборов Северной перспективной площади с суммарной производительностью 877 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$  или  $10,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ , значительно превышающей возможную производительность компенсационного водозабора, за счет перехвата речных вод в течение 10 месяцев работы такого водозабора будут формироваться лишь 5% водоотбора. Ущерб стоку может составить таким образом около  $0,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ . При водоотборе, соответствующем максимально возможному дефициту в  $2,1 \text{ м}^3/\text{сек}$ , ущерб не превысит  $100 \text{ л}/\text{сек}$  один раз за 14 лет, что при экологическом стоке в  $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$  не сможет вызвать какие-то катастрофические последствия.

Следует еще раз подчеркнуть, что вопрос о необходимом санитарном стоке в самые маловодные годы должен решаться отдельно. Наблюдения показывают, что в редкие засушливые годы сток в р. Дубне сокращался в прошлом (до 1981 г.) до  $0,01\text{--}0,1 \text{ м}^3/\text{сек}$ . При этом маловодные месяцы отмечались по всему году: в марте до  $0,91 \text{ м}^3/\text{сек}$ , в мае –  $0,97 \text{ м}^3/\text{сек}$ , июле –  $0,01 \text{ м}^3/\text{сек}$ , октябре –  $0,37 \text{ м}^3/\text{сек}$ , ноябре –  $0,1 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Никаких экологических катастроф при этом не отмечалось. Поэтому, если в качестве минимального санитарного стока сохранить  $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ , как принято нами, то можно с еще большей уверенностью заключить, что таких катастроф не произойдет. Возможность поддержать такой сток в реке в отдельные маловодные годы показана отмеченным выше расчетом форсированного отбора подземных вод. Восполнение форсированно рабо-

танных запасов подземных вод также гарантировано. Как в фактическом, так и в смоделированных рядах после каждого маловодного периода наиболее вероятно последуют многоводные годы, превышающие маловодную серию как по продолжительности, так и по объемам стока.

Выполненные оценки как по данным хронологического ряда, так и по смоделированному ряду показывают высокую перспективность совместного использования поверхностных и подземных вод в долине р. Дубны. Возможный водоотбор данным способом может быть здесь выше производительности планируемых водозаборов на подземные воды. При этом такой водоотбор может быть неограниченным во времени и при отсутствии сколько-нибудь существенных негативных экологических последствий и прежде всего без какого-либо ущерба многочисленным малым рекам, на многих из которых располагаются созданные здесь биосферные заказники. Компенсационный водозабор будет намного компактнее, чем растянутые вдоль Дубны и Вели многокилометровые ряды водозаборных скважин. При решении осуществлять забор воды не из реки, а инфильтрационным водозабором, последний может быть заложен одновременно на надморенный, межморенный и мезозойские водоносные горизонты, тесно взаимосвязанные с рекой и изолированные от каменноугольных горизонтов толщиной юрских глин. Для этого потребуются дополнительные изыскания с целью выбора участков с наиболее высокой производительностью этих горизонтов и наилучшей связью поверхностных и подземных вод. Перспективными здесь могут быть участки переуглубленных долин, прорезающих серию водоносных горизонтов, где суммарная водопроводимость может достигать 400 м<sup>3</sup>/сут. При допустимом понижении порядка 30 м в таких условиях производительность скважины в линейном ряду может составить 6,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Однако, для получения проектного водоотбора в этом случае потребовалось бы до 800 скважин. Поэтому возможно более выгодным может оказаться комбинация из лучевых водозаборов или галерей с скважинным водозабором. Таким образом выбор рациональной схемы водоотбора может определить лишь технико-экономический расчет.

Другим перспективным водосбором севера области является долина р. Сестры. Река Сестра берет начало из Сенежского озера, представляющего собой водохранилище, созданное в верховьях реки в XIX веке и впадает в р. Дубну. Среднегодовой сток реки по посту Трехсвятское составляет 8,7 м<sup>3</sup>/сек. Каких-либо заметных трендов в среднегодовом стоке не отмечается. Однако в меженном зимнем (январь, февраль) и минимальном годовом среднемесечном стоке 95% обеспеченности такие тренды просматриваются с 1982 года (рис.9.8).



**Рис. 9.8.** Хронологический график меженных зимних расходов р. Сестры

Приуроченность начала нарушений стока к 1982 г. хорошо фиксируется двойными интегральными кривыми стока р. Сестры и р. Москвы, что позволяет анализировать отдельно сток с этого момента.

Так, среднегодовое меженное зимнее стока до 1981 г. включительно составлял  $3,38 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а с 1982 по 1995 г. —  $4,58 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Интересно отметить, что разность между этими расходами в  $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$  соответствует суммарному водоотбору из глубоких водоносных горизонтов. Последний по данным на 1993 г. в Солнечногорске равен 37 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ , в Клину — 57,8 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ , в Чайковском — 2,3 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ , Высоковске — 5,7 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ , Решетникове — 1,8 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$  и Зиброво — 1,8 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ . В сумме водоотбор составляет 104,6 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$  или  $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Таким образом вполне вероятно, что рост меженных расходов рек определяется именно возвратными водами. Разность среднегодовых расходов стока за период до 1981 г. включительно и с 1982 г. составила лишь  $0,8 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Несоответствие прироста зимних и среднегодовых расходов рек в какой-то мере определяются летним разбором воды из реки. Из водохозяйственного баланса реки известно, что водоотбор из нее оценивается в 34,93 млн  $\text{м}^3$  в год, сброс назад — в 27,14 млн  $\text{м}^3$ , а безвозвратные потери — в 7,42 млн  $\text{м}^3$  (или  $0,84 \text{ м}^3/\text{сек}$ ). Минимальный 30-дневный среднемесячный расход реки 95% обеспеченности по периоду до 1981 г. составил  $2,33 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Отсюда, если принять по аналогии с р. Дубной необходимый экологический сток в реке, равный  $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ , то потенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод составят всего  $0,83 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Большой водоотбор из реки мог бы уже рассматриваться как недопустимый ущерб малой реке. Минимальный среднемесячный расход реки 95% обеспеченности за период с 1982 по 1995 г. составил  $3,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ . По-



тенциальные эксплуатационные ресурсы подземных вод в этом случае можно оценить уже в  $2,0 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Планируемый на перспективу водоотбор из каменноугольных водоносных горизонтов в долине оценивается в 417 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$  или  $4,8 \text{ м}^3/\text{сек}$ , включая увеличение водоотбора на Клинском водозаборе с 97 до 117 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$  и новый водозабор на 300 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ .

Для обеспечения проектного водоотбора способом комбинированного использования поверхностных и подземных вод расчетный расход реки должен составить  $6,3 \text{ м}^3/\text{сек}$  (из расчета  $4,8 \text{ м}^3/\text{сек}$  – производительность водозабора и  $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$  требуемый остающийся экологический сток). При таком водоотборе компенсационный водозабор должен включаться ежегодно, погашая дефициты стока, продолжительностью от 3-х до 8 месяцев. Исходя из предпосылки возможного ежегодного водоотбора подземных вод и гарантии соответственно ежегодного восстановления уровней, продолжительность работы компенсационного водозабора не должна превышать 6 месяцев непрерывного отбора. Используя в качестве прогнозного хронологический ряд с 1982 по 1995 г. и исключив возможность роста расходов реки в соответствии с климатическим трендом, можно установить, что за 14 лет могли бы встретиться четыре года в разбивку (рис.9.9) с числом дефицитных месяцев по 7 (два) и 8 (два). Однако во всех этих годах маловодные серии разбиваются на две части весенним паводком. В результате каждая маловодная серия не превышает 6 месяцев. Максимально возможный среднемесячный дефицит стока может при этом составить при шестимесячной непрерывной работе компенсационного водозабора, что могло бы произойти в год аналогичный 1992 г.,  $2,1 \text{ м}^3/\text{сек}$ . В зимнюю межень 1986–1987 гг. в течение 4-х месяцев средний дефицит составил  $2,3 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Гидрогеологические условия долины р. Сестры близки к таковым в долине р. Дубны. Поэтому расчетные гидрогеологические параметры для оценки производительности компенсационного водозабора могут быть приняты идентичными (т.е.  $km = 3000 \text{ м}^3/\text{сут}$ ,  $\alpha_i = 10^6 \text{ м}^3/\text{сут}$ ,  $S_{\text{дон}} = 70 \text{ м}$  и  $R_0 = 1000 \text{ м}$ ). При таких параметрах производительность водозабора в течение 6 месяцев непрерывной работы составит  $5,1 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а при 4 месяцах –  $5,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ , т.е. более чем в 2 раза выше требуемой для покрытия максимально возможных средних за маловодную серию дефицитов стока. Имеющийся запас подземных вод позволяет покрывать дефициты стока и в том случае, если две маловодные серии сгруппируются подряд, что мало вероятно. Как правило каждый год имеет четко выраженный 3–4-месячный паводок с расходами реки, не редко на порядок превышающими возможные дефициты стока как зимние, так и летние.

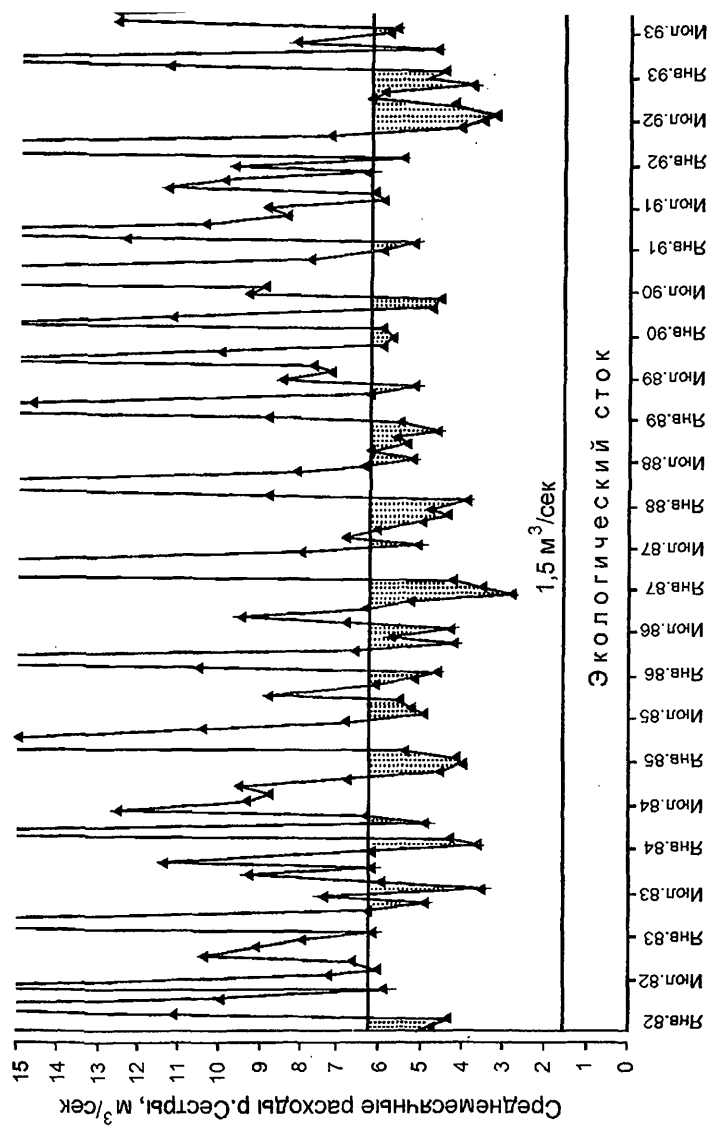


Рис. 9.9. Хронологический график среднемесячных расходов р. Сестры

Таковыми же систематичными, но явно менее значимыми, являются осенние паводки, разделяющие зимнюю и летнюю межень. Лишь в отдельные годы, как в 1988 и 1992 годах, когда расходы осеннего стока оказались сопоставимыми с принятым расчетным стоком, создались условия для шестимесячной маловодной серии. Во всех остальных случаях маловодные серии имеют продолжительность чаще всего 3–4 месяца, перемежающиеся не менее продолжительными многоводными сериями, во время которых осуществляется полное восстановление напоров. В целом за анализируемый период суммарная продолжительность дефицитных периодов также составила менее 50% всего ряда, что гарантирует условие восполнения запасов подземных вод в многолетнем разрезе.

В результате в долине р. Сестры выше Трехсвятского может быть заложен основной водозабор на поверхностный сток или инфильтрационный водозабор на подземные воды производительностью 4,8 м<sup>3</sup>/сек, работающий в многоводные периоды, и компенсационный водозабор на напорные горизонты производительностью до 2,3 м<sup>3</sup>/с для покрытия дефицитов стока в маловодные периоды с пропорциональным дефицитам снижением производительности основного водозабора в целях обеспечения сохранения меженного экологического стока.

Ущерб стоку, как было показано выше, при такой периодичности эксплуатации достаточно хорошо изолированных от поверхностного стока напорных вод не превышают 5%, что находится в пределах точности гидрологических измерений.

Таким образом, комбинированное использование поверхностных и подземных вод может стать реальной альтернативой непрерывному использованию только подземных вод. Этим способом в долине р. Сестры можно получить такое же количество воды, как и на разведанном водозаборе, но неограниченно во времени, без истощения запасов подземных вод и без каких-либо негативных последствий в окружающей среде, в том числе без создания условий взаимодействия с соседними водозаборами (Дубнинскими, Вельскими и др.), без развития огромной региональной воронки депрессии, неизбежно приводящей к ущербам стоку многочисленных малых рек.

Нарушенным режимом характеризуется и р. Воря (п. Мишнево). Четкие тренды начали прослеживаться здесь с 1974 г., а с 1984 г., судя по меженным зимним расходам рек, градиент тренда возрос еще более (рис 9.10).

При этом минимальные за многолетие 30-дневные зимние расходы (1,28 м<sup>3</sup>/с), были отмечены в самом начале наблюдений (1979 г.) при среднегодовых значениях стока в пределах 5–6 м<sup>3</sup>/сек. В последние же 10 лет

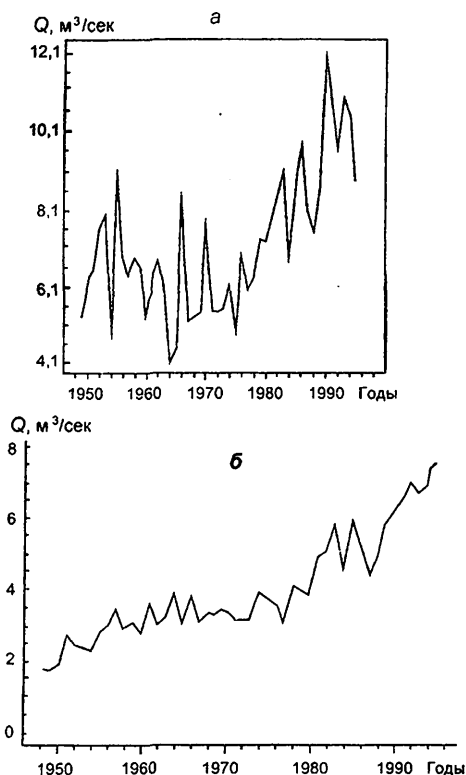


Рис. 9.10. Хронологические графики среднегодовых (а) и межених зимних (б) расходов р. Воря

минимальные зимние расходы реки как правило выше  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ , а среднегодовые в пределах  $7\text{--}10 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Подобное увеличение и зимних, и среднегодовых значений стока также можно увязать со сбросом возвратных вод. Так, в бассейне реки суммарный водоотбор в городах и поселках Сергиев Посад (Загорск), Хотьково, Абрамцево, Красноармейск и др. составляет около 150 тыс.  $\text{м}^3/\text{с}$  или  $1,74 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Около  $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$  может составить увеличение питания рек за счет изменений климата в последние 20 лет. Разбор воды из реки по данным водохозяйственного баланса хотя и значителен ( $44,25 \text{ млн м}^3$  в год), однако безвозвратные потери составляют всего  $0,68 \text{ млн м}^3/\text{год}$ , т.е. почти вся забранная вода сбрасывается назад в реку.

Наличие четко выраженного тренда потребовало его выделения и реконструкции графика относительно тренда, аналогично рисунку 9.4. Реконструкции был подвергнут период с 1979 г. Среднегодовое значение тренда было принято в  $8,0 \text{ м}^3/\text{сек}$ . В отличие от графика 9.4 реконструированный график был перестроен не по среднегодовым, а по среднемесячным значениям (рис.9.11). Это позволило прямо с графика снимать возможные значения дефицитов стока при выбираемых вариантах допустимого среднегодового водоотбора.

Экологический сток, оцененный по ранним наблюдениям, составил округленно  $1 \text{ м}^3/\text{сек}$ , что сопоставимо с аналогичным стоком рассмотренных выше малых рек.

Анализ реконструированного графика показал, что при условии сохранения экологического стока, из реки можно отбирать минимум  $3 \text{ м}^3/\text{сек}$ . При этом дефициты стока не будут превышать  $0,5 \text{ м}^3/\text{сек}$  в течение 2-х месяцев. Лишь в одном случае (1995 г.) дефицит может достичь  $1 \text{ м}^3/\text{сек}$ . В остальных случаях за 17 лет нарушенного режима стока (с 1979 по 1995 г.) маловодных серий с дефицитом по  $0,5 \text{ м}^3/\text{сек}$  могло бы встретиться лишь 2 раза. При этом маловодными оказались бы периоды продолжительностью в 1 месяц и намного меньшими дефицитами. Тем не менее компенсационный водозабор потребовалось бы включать 9 раз.

При водоотборе в  $4 \text{ м}^3/\text{сек}$  количество дефицитных периодов возрастает до 24. При этом в ряде лет они будут появляться дважды в год. Дефициты стока также возрастут в отдельные месяцы до  $1,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ , составляя в течение 3-х месяцев в среднем около  $0,7 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а в аномальную зимнюю межень 1995–1996 гг. маловодная серия достигнет 5 месяцев. Однако и такой водоотбор допустим.

Как известно, в долине р. Воря планируется сооружение водозабора на подземные воды в количестве 104 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$  или  $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Приведенная выше оценка свидетельствует, что способом комбинированного использования поверхностных и подземных вод в долине можно отбирать в 3 с лишним раза больше без истощения запасов подземных вод и каких-либо отрицательных экологических последствий. При этом при расходах реки свыше  $5 \text{ м}^3/\text{сек}$  все  $4 \text{ м}^3/\text{сек}$  могут отбираться либо прямо из реки, либо инфильтрационным водозабором. При снижении расхода реки ниже  $5 \text{ м}^3/\text{сек}$  должен включаться компенсационный водозабор с производительностью, равной дефициту стока.

Гидрогеологические условия в долине р. Вори благоприятны для создания инфильтрационного водозабора. Вся верхняя водовмещающая толща представлена песками мощностью до 20–30 м, включая аллювий I

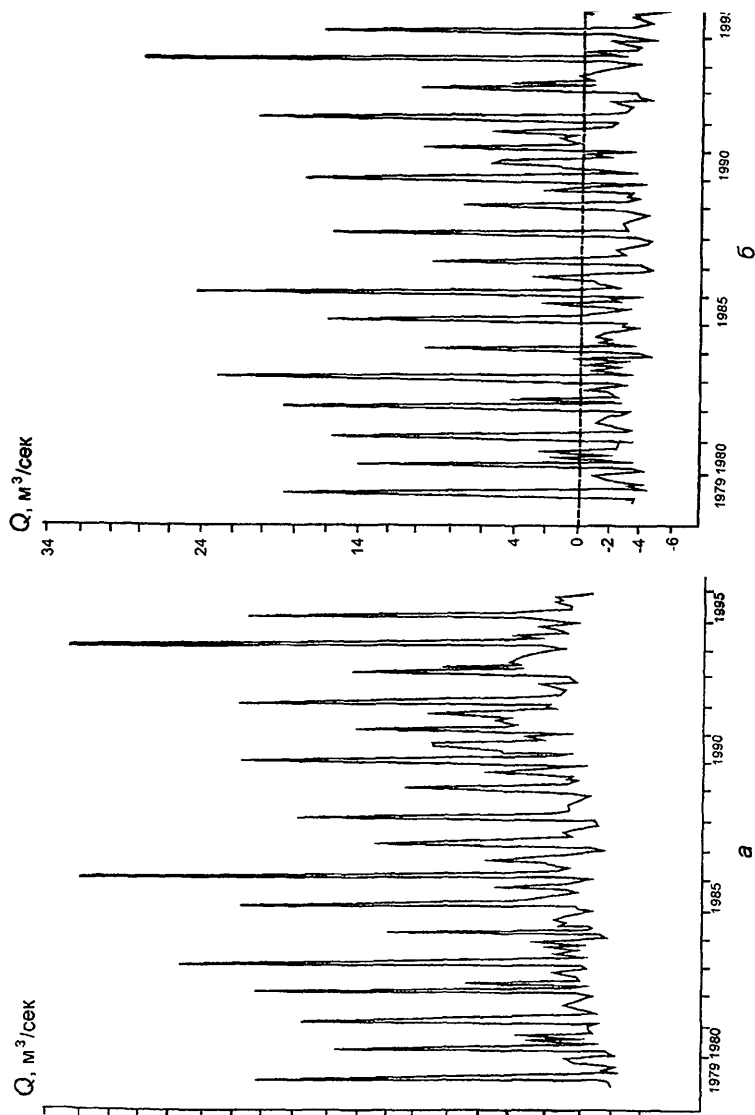


Рис. 9.11. Хронологические графики расходов р. Вора до (а) и после (б) выделения тренда  
' — линия тренда

и II надпойменных террас, а также водоносные горизонты нижнего мела и верхней юры.

При суммарной водопроницаемости верхнего водоносного комплекса около  $150 \text{ м}^3/\text{сут}$  и допустимом понижении 15 м производительность эксплуатационных скважин может достигать  $600 \text{ м}^3/\text{сут}$ . В результате проектный инфильтрационный водозабор должен содержать около 70 скважин, расположенных через 100 м в виде линейного ряда.

Основной продуктивный турабьевский водоносный горизонт залегает на глубине 50–60 м под 15-метровой выдержанной толщей юрских глин. Надежная изоляция этого горизонта от реки, позволяет гарантировать отсутствие какого-либо ущерба стоку при водоотборе  $0,7 \text{ м}^3/\text{сек}$  в течение 3-х месяцев. Расчетная производительность водозабора способна на этот срок обеспечить около  $2 \text{ м}^3/\text{сек}$  при  $km = 1500 \text{ м}^3/\text{сут}$  и допустимом понижении в 50 м.

Суммируя все вышеизложенное, можно заключить, что в долинах малых незарегулированных рек Московского региона с внедрением систем совместного использования поверхностных и подземных вод можно не только повысить эффективность или коэффициент использования водных ресурсов, но и повысить надежность и стабильность водообеспечения. Даже на реках с отсутствием техногенных трендов, или без их учета, потенциальные эксплуатационные водные ресурсы могут быть увеличены в 3–5 раз. В условиях же устойчивых трендов, как на Воре, возможности использования поверхностного стока возрастают более чем в 10 раз по сравнению с допустимым водоотбором из реки в естественных условиях. Как показали выполненные выше оценки, системы совместного использования поверхностных и подземных вод могут стать реальной альтернативой созданию крупных централизованных водозаборов, приводящих, как правило, со временем к истощению запасов подземных вод, недопустимым ущербам меженному стоку и экологии, осушению колодцев в деревнях и т.д. В ряде случаев данным способом можно получить даже существенно больше воды по сравнению с работающим на пределе традиционным скважинным водозабором.

Наиболее рациональной схемой СИПИВ в таких условиях является заложение основного инфильтрационного водозабора, перехватывающего поверхностный сток, на грунтовые и взаимосвязанные с ними напорные горизонты верхней надъярской толщи, а компенсационного водозабора на первый напорный горизонт, перекрытый водоупором, затрудняющим его взаимосвязь с рекой. В условиях высокой взаимосвязи поверхностных вод и первого от поверхности каменноугольного напорного водоносного горизонта последний может использоваться для

создания основного водозабора, перехватывающего поверхностный сток. Для компенсационного водозабора в этом случае может использоваться чаще менее продуктивный второй от поверхности напорный горизонт.

Таким образом при такой схеме вся подаваемая потребителю вода будет подземной: только одна ее часть более тесно связана с поверхностным стоком, а другая – менее или практически не связана. В тех случаях, когда продуктивность надъюрского водоносного комплекса и степень гидравлической взаимосвязи поверхностных и подземных вод не высока и не позволяет перехватить требуемое количество поверхностного стока, могут быть рассмотрены различные варианты решения данной проблемы: а) изыскать оптимальную конструкцию водозаборного сооружения, включая комбинацию скважинного водозабора, лучевого водозабора и галереи, б) организовать искусственное восполнение запасов подземных вод и, наконец в) создать основной водозабор прямо из поверхностных вод. Последний вариант, несмотря на его техническую и экономическую перспективность, не обеспечивает гарантии сохранения требуемого качества воды от случайных непредвиденных загрязнений.

Качество воды, подаваемой в итоге потребителю, должно стать одним из факторов, учитываемых в выборе схемы водозаборов. Как показывают материалы изысканий, выполненных под перечисленные выше централизованные водозаборы, качество поверхностных и подземных вод по многим тестируемым ингредиентам довольно близко. Все эти воды в основном пресные, гидрокарбонатно-кальциевые, с минерализацией чаще 0,3–0,5 г/л, с нейтральной реакцией, с содержанием токсичных компонентов ниже допустимых пределов. Поверхностные воды, как правило, несколько менее минерализованы (0,2–0,3 г/л), с невысокой жесткостью (3–6 мг-экв/л), с низкими содержаниями тяжелых металлов, марганца и лишь с небольшими превышениями норм ГОСТа по железу (до 0,7–0,8 мг/л), а также не редко с появлением нефтепродуктов, фенолов и азотных загрязнений особенно в весеннее время.

Подземные воды как грунтовые, так и основные напорные несколько более минерализованы (до 0,4–0,5 г/л) и лишь с глубиной в основном в северо-восточном направлении минерализация напорных вод возрастает до 0,9–2 г/л и даже до 6,6 г/л (в мячковско-подольском горизонте). Подземные воды на разведанных участках по большинству гостируемых компонентов отвечают требованиям, предъявляемым к питьевым водам. Исключение составляет повышенное содержание железа до 1,5–4,5 мг/л, марганца до 1,2–2 мг/л, стронция до 0,5–1,5 мг/л и даже до 4,5 мг/л, фтора 0,1–2,1 мг/л, иногда жесткости – до 9,8 мг-экв/л. Отклонения от норм чаще всего увеличиваются с глубиной.



При постоянном водоотборе подземных вод в результате возрастает риск снижения их качества за счет подсоса некондиционных вод снизу. При периодическом водоотборе такой риск практически исключен. При работе инфильтрационных водозаборов наоборот появляется возможность улучшения качества воды за счет смешения менее минерализованных по всем компонентам поверхностных вод с подземными, содержащими указанные отклонения от норм. В результате в основных инфильтрационных водозаборах, где доля поверхностных вод преобладает, качество воды в смеси улучшится благодаря самоочищению поверхностных вод и снижению концентраций в смеси компонентов, превышающих нормы в подземных водах. Также улучшение качества воды в смеси следует ожидать в любом случае при смешении вод компенсационного водозабора с водой основного водозабора (естественно в различной степени – в зависимости от соотношения количества воды, отбираемой основным и компенсационным водозаборами).

Таким образом СИПИВ имеет несомненные преимущества при организации водоотбора в долинах малых рек как с позиций количества отбираемой воды, так и с точки зрения качества подаваемой потребителю воды.

---

---

## *Глава 10*

# **ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ ВОДОСБОРОВ ЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ РЕК И НАДЕЖНОСТИ ОТДАЧИ ВОДОХРАНИЛИЩ ПИТЬЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Внедрение систем комбинированного использования поверхностных и подземных вод может оказаться еще более перспективным в долинах зарегулированных рек и особенно в районах водохранилищ питьевого назначения. С одной стороны, зарегулированный сток исключает появление исключительно маловодных периодов, аналогичных в незарегулированных реках, что позволяет ориентироваться на меженный сток не редко в несколько раз более высокий, чем наблюдался в данной реке в естественных условиях. С другой стороны, имеющиеся технические условия для регулирования стока позволяют управлять им, в том числе в целях снижения продолжительности маловодных серий, повышая тем самым возможную производительность компенсационных водозаборов и тем самым суммарную отдачу системы в целом.

Наиболее эффективным совместное использование поверхностных и подземных вод несомненно будет в долинах рек, зарегулированных водохранилищами и особенно водохранилищами питьевого назначения, то есть с контролируемым качеством воды.

Московский регион обладает большим количеством относительно больших и малых водохранилищ как сезонного, так и многолетнего регулирования. Среди них можно назвать прежде всего такие как Ивановское, Икшинское, Пестовское, Пяловское, Учинское, Химкинское, Клязьминское, Пироговское, Можайское, Истринское, Озернинское, Руз-

ское, а также ряд малых водохранилищ, регулирующих в той или иной мере сток малых рек. В числе последних можно отметить Сенежское, Подольское, Шатурское, Лотошинское, Новоселковское, Яхромское, Трудкоммуновское, Шалаховское и др., не считая многочисленные «нагульные пруды» с площадью зеркала до 2 км<sup>2</sup>. Все эти водохранилища могут рассматриваться как перспективные участки создания систем совместного использования поверхностных и подземных вод, т.е. они обладают благоприятной возможностью не только регулировать сток, но и восполнять запасы подземных вод.

Спецификой методологии исследований, связанных с обоснованием оптимального функционирования систем совместного использования поверхностных и подземных вод в долинах зарегулированных рек и, в том числе, в районах водохранилищ, в отличие от речных долин с незарегулированным стоком, является необязательность или второстепенность установления природных закономерностей чередований многоводных серий. Связано это с тем, что режим работы водохранилищ и стока реки в значительной мере зарегулирован, т.е. управляется соответствующими диспетчерскими графиками и поэтому не может считаться естественным природным. Выбор оптимальной продолжительности маловодных серий и максимально возможных дефицитов в них в данном случае определяется и диктуется главным образом гидрогеологическими условиями, характеризующими принципиальную возможность покрытия дефицитов в поверхностном стоке за счет имеющихся запасов подземных вод. Другими словами, исследования следует начинать в данном случае с оценок запасов подземных вод развитых в регионе водоносных горизонтов и обоснования рациональных режимов их сработки. Оценив потенциальные возможности подземных вод погашать дефициты стока применительно к различным вариантам вероятных продолжительностей маловодных серий, можно затем осуществлять корректировку диспетчерского графика работы водохранилища с целью максимально возможного сокращения продолжительностей маловодных периодов до оптимальных (с точки зрения возможностей подземных вод) и оценки вероятных дефицитов стока при выбранной схеме управления стоком.

Другой важной отличительной особенностью методологии исследований в районах водохранилищ питьевого назначения является отсутствие необходимости обоснования условий оптимального заложения основного водозабора, рассчитанного на перехват поверхностного стока в многоводный период. Это определяется тем, что поверхностный сток в данном случае и так прямо используется для водоснабжения, а паводковые воды, расходуемые в незарегулированных реках бесполезно, могут

аккумулироваться в водохранилище. Поэтому в районах водохранилищ питьевого назначения достаточным может быть обоснование заложения только компенсационного водозабора с оценкой его производительности, возможных ущербов стоку при его работе и оценкой гарантированности восполнения сработанных запасов подземных вод до очередного вероятного маловодного периода.

Пример такой оценки целесообразно также рассмотреть для конкретного водохранилища – Ивановского, имеющего наибольшую практическую значимость для Москвы.

Как известно, данный Верхневолжский источник водоснабжения г. - Москвы обеспечивает около 2/3 ее потребности в хозяйственно-питьевой воде. Среднегодовой сток Волги в створе Ивановского водохранилища составляет 255 м<sup>3</sup>/сек, а меженный – всего 26 м<sup>3</sup>/сек, что потребовало регулирования стока в целях его использования для водоснабжения Москвы. В настоящее время водные ресурсы этой водохозяйственной системы управляются Верхневолжским и Ивановским водохранилищами, обеспечивающими гарантированную водоподачу в Москву по каналу им. Москвы в размере 82 м<sup>3</sup>/сек в год 95% обеспеченности и 78 м<sup>3</sup>/сек – в год 97% обеспеченности. Условно принятое снижение допустимой величины водоподачи в Москву определено в 20% от нормы при условии сохранения попусков в нижний бьеф Ивановского водохранилища не менее 5 м<sup>3</sup>/сек. Имеющийся 33-х летний ряд гидрологических наблюдений (с 1914 по 1987 гг.) показал, что в отдельные маловодные годы могут возникать дефициты водоподачи, превышающие допустимые. В этой связи возникает проблема повышения надежности водоподачи из Ивановского водохранилища. При этом главным в этой проблеме на данном этапе представляется экологический аспект. Вызвано это тем, что значительная часть забираемой из водохранилища воды (до 30 м<sup>3</sup>/сек) расходуется на повышение качества воды в р. Москве. Поэтому при возникающих дефицитах в водохранилище их погашение, т.е. поддержание стабильной водоподачи в город на его нужды идет за счет сокращения экологических сбросов воды в р. Москву. В результате страдает не столько сам город, как экология бассейна р. Москвы. В итоге, как было показано выше, качество воды р. Москвы далеко не соответствует требуемым нормам с превышениями ПДК по многим показателям в несколько раз. Для улучшения экологического состояния и оздоровления бассейна р. Москвы, а также для оценки перспектив наращивания водопотребления в самой Москве, с учетом неизбежного в будущем роста ее промышленности и населения требуется не только изыскивать новые дополнительные источники водоснабжения, но и в первую очередь

переоценивать возможности существующих источников: в какой мере можно увеличить водоподачу из них при более рациональном и эффективном использовании. В том числе и для Иваньковского водохранилища важным с практической точки зрения представляется оценить, в какой мере использование подземных вод сможет служить дополнительным источником водоснабжения для покрытия возникающих периодических случайных дефицитов, в какой мере подобное совместное использование поверхностных и подземных вод сможет увеличить отдачу водохранилища, т.е. повысить гарантированность или надежность водоподачи в Москву, одновременно необходимо сформулировать, какие при этом возникают требования к правилам управления режимом работы водохранилища, которые могли бы повысить коэффициент использования водных ресурсов в регионе.

Район Иваньковского водохранилища весьма перспективен для организации системы совместного использования подземных и поверхностных вод. Предпосылками этому могут служить следующие соображения. Район располагается за пределами региональной воронки депрессии, сформировавшейся под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод в Москве и ЛПЗП. Эксплуатация основных каменноугольных водоносных горизонтов здесь невелика, и кратковременный, даже форсированный, водоотбор подземных вод существенно не скажется на данной воронке и не сможет ухудшить тем самым условия водоснабжения населения за счет подземных вод как в центре области, так и в данном районе. Основные продуктивные водоносные горизонты располагаются здесь под толщей обводненных четвертичных отложений и перекрыты выдержанными водоупорными слоями. Все это создает условие для достаточно длительной эксплуатации подземных вод без существенных ущербов поверхностному стоку и, соответственно, обеспечивать покрытие дефицитов стока в течение продолжительных маловодных серий.

Рациональная схема эксплуатации подземных вод в целях совместного использования поверхностных и подземных вод в таких условиях может быть принята в виде линейного ряда водозаборных скважин, расположенных вдоль водохранилища с фильтрами, заложенными одновременно на 1–2 наиболее перспективных напорных горизонта. Учитывая многослойность гидрогеологического разреза и значительную, как правило, глубину залегания основных продуктивных водоносных горизонтов, расстояние водозабора от водохранилища может быть минимальным. Ущерб поверхностному стоку в течение периодической кратковременной работы водозабора при этом практически не будет. Водообильность же отложений вдоль долин существенно выше, чем на между-

речьях, и кроме того для сброса подземных вод в водохранилище не потребуется значительных трубопроводов. Лучшими здесь будут и условия восполнения сработанных запасов подземных вод за счет перетекания сверху из четвертичных отложений со стабилизирующей ролью водохранилища.

Масштабы возможного форсированного водоотбора подземных вод и восполняемость сработанных запасов можно рассмотреть на примере достаточно хорошо изученного участка правобережья Иваньковского водохранилища на отрезке от г. Конаково до д. Плоски. В основу произведенных прогнозных расчетов положены данные выполненной Геологическим управлением центральных районов разведки эксплуатационных запасов подземных вод для г. Конаково. Водозабор запроектирован здесь в виде линейного ряда длиной в 10 км вдоль правого берега водохранилища выше по течению от города на расстоянии 100–150 м от его уреза и состоит из 6 водозаборных узлов с двумя эксплуатационными скважинами в каждом. В гидрогеологическом разрезе на участке водозабора установлены 4 водоносных горизонта: I – грунтовые воды в современных супесчаных четвертичных отложениях; II – межморенный среднечетвертичный (днепровский) напорный водоносный горизонт; III – верхнежельский (клязьминско-ассельский) напорный горизонт и IV – нижнежельский (касимовский) напорный горизонт. Основными наиболее продуктивными в разрезе являются каменноугольные горизонты (III и IV), которые достаточно хорошо изолированы друг от друга и могут рассматриваться самостоятельными. Клязьминско-ассельский горизонт перекрыт сверху юрскими глинами, а подстилается щелковскими глинами. Касимовский горизонт перекрыт щелковскими глинами и подстилается кривякинскими глинами. Все эти водоупоры довольно выдержаны по площади и лишь юрские глины размыты местами в долине Волги и на западе района за пределами зоны влияния водозабора.

Таблица 10.1

Основные расчетные гидрогеологические параметры в районе водозабора

| № водоносного горизонта | Разделяющие слои | Мощность отложений, м | Водопроводимость $km$ , $m^2/сут$ |
|-------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| I                       |                  | 10                    | 100–450                           |
| II                      |                  | 20                    | 1–200                             |
|                         | юрский           | 20                    |                                   |
| III                     |                  | 30                    | 150–5400                          |
|                         | щелковский       | 10                    |                                   |
| IV                      |                  | 35                    | 40–250                            |

Расчет эксплуатационных запасов подземных вод был выполнен методом моделирования для четырехслойной системы и показал возможность суммарного водоотбора из горизонтов III и IV в 52,8 тыс. м<sup>3</sup>/сут при понижении 30 м за 50 лет эксплуатации.

Вполне очевидно, что сработка этих же запасов подземных вод за более короткий промежуток времени может обеспечить значительно большее количество воды.

Выполненный нами пересчет возможного форсированного водоотбора из тех же водоносных горизонтов осуществлен по тем же расчетным гидрогеологическим параметрам, которые были откорректированы на модели при решении обратной задачи (табл. 10.1).

Принимая во внимание высокое сопротивление разделяющего слоя между основными III и IV водоносными горизонтами и относительную кратковременность форсированного водоотбора, расчеты по ним были произведены отдельно как для невзаимодействующих между собой водоносных горизонтов.

При этом для расчетов водоотбора из IV горизонта была принята схема неограниченного изолированного напорного пласта, а для III водоносного горизонта, где сопротивление юрских глин местами снижается до  $5 \cdot 10^{-3}$  л/сут, принята расчетная схема неограниченного напорного пласта с перетеканием сверху.

Для обоих расчетов водозабор принят линейным, но обобщенным в виде «большого колодца» радиусом  $R = 0,37l$ , где  $l$  – длина линейного ряда эксплуатационных скважин (10 км). Расчет возможной производительности первого водозабора (на III горизонт) осуществлен по уравнению Ф.М. Бочевера [4].

$$Q = \frac{S_{дон} \cdot 4 \pi k m}{2 \ln \frac{1,12 B}{R}} + \frac{S_{дон} \cdot 4 \pi k m}{Ei \left( -\frac{at}{B^2} \right)}, \quad (10.1)$$

таблица 10.1 (окончание)

| Сопротивление<br>$k_0/m_0$ , л/сут  | Водоотдача,<br>$\mu$ | Допустимое<br>понижение, $S_{дон}$ , м | Коэффициент<br>пьезопроводности, $a$ , м <sup>2</sup> /сут |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                                     | 0,1                  |                                        |                                                            |
|                                     | 0,001                |                                        |                                                            |
| $5 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-7}$ | $4 \cdot 10^{-5}$    | 43,5                                   | $6 \cdot 10^5$                                             |
| $10^{-7}$                           | $4 \cdot 10^{-6}$    | 83,5                                   | $1,4 \cdot 10^6$                                           |

где, помимо указанных в таблице обозначений,  $B$  – коэффициент перете-

кания  $\left( B = \sqrt{\frac{km \cdot m_0}{k_0}} = 9000 \text{ м} \right)$  и  $E_i$  – табулированная экспоненциальная функция.

Расчет произведен для трех интервалов времени – 30, 60 и 90 суток, т.е. для вероятных маловодных периодов продолжительностью 1–3 месяца. Расчет показал возможность отбора из данного горизонта за 30 суток – 6,72 м³/сек, за 60 суток – 4,03 м³/сек и за 90 суток – 3,38 м³/сек.

Расчет возможной производительности второго водозабора (на IV горизонт) осуществлен по уравнению Тейса [3, 4]:

$$Q = \frac{4 \pi km \cdot S_{дон}}{-Ei \left( -\frac{R^2}{4at} \right)} = \frac{4 \pi km \cdot S_{дон}}{\ln \frac{at}{R^2}}, \quad (10.2)$$

Этот расчет показал возможность форсированного водоотбора за 30 суток в размере 1,28 м³/сек, за 60 суток – 0,945 м³/сек и за 90 суток – 0,88 м³/сек.

В качестве допустимого понижения в обоих расчетах принята величина напора водоносного горизонта, т.е. сработка емкости самого пласта не предусматривается, что создает определенный «запас прочности» выполненных оценок.

Эти расчеты и данные опытных определений основных гидрогеологических параметров в районе водозабора подтвердили отмеченную выше общую для региона закономерность о значительном снижении продуктивности водоносных горизонтов артезианского бассейна с увеличением глубины их залегания от поверхности земли.

В сумме из обоих горизонтов таким образом для выбранных вариантов продолжительности водоотбора можно получить (табл.10.2).

Учитывая опыт разведки данного месторождения подземных вод, показавший возможность отбора из одной эксплуатационной скважины около 15 тыс. м³/сут, для проектного водоотбора потребуется создание узлов водозаборных скважин, состоящих из 3 или даже 4 эксплуатационных скважин в каждом из них. В результате проектный водозабор может потребовать создания от 18 до 34 таких водозаборных узлов, расположенных в среднем на расстояниях соответственно от 300 до 500 м между ними.



Таблица 10.2

Зависимость производительности водозабора от продолжительности водоотбора

| Продолжительность водоотбора или маловодного периода, сут | Производительность водозабора |                     | Число водозаборных узлов |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------------|
|                                                           | тыс. м <sup>3</sup> /сут      | м <sup>3</sup> /сек |                          |
| 30                                                        | 684900                        | 7,95                | 34                       |
| 60                                                        | 429300                        | 4,8                 | 21                       |
| 90                                                        | 362200                        | 4,2                 | 18                       |

Форсированная эксплуатация подземных вод с почти полной или частичной сработкой их запасов ставит вопрос о сроках их восполнения, обеспечивающих бесперебойность работы таких водозаборов в последующие маловодные периоды.

Принимая во внимание принятые условия эксплуатации, рассчитанные только на сработку напора водоносных горизонтов, не осушая емкости горизонта, прогнозный водоотбор будет обеспечиваться только за счет упругих запасов подземных вод. Восстановление напоров (упругих запасов) не в абсолютно закрытом пласте, как уже отмечалось выше, осуществляется практически (до 90% и более) за те же сроки, что и их снижение, так как отключение водоотбора моделируется как бы включением нагнетательной скважины с момента прекращения эксплуатации с производительностью равной предшествовавшему водоотбору.

Влияние «наследства», то есть эффекта продолжительности откачки ( $T$ ) на продолжительность восстановления ( $t$ ) при  $t > 0,1 T$  может длиться теоретически довольно долго. Однако недовосстановление напоров за пределами  $t=T$ , как правило, незначительно и в реальных условиях покрывается перетеканием, так как, как показало моделирование, этот горизонт не является абсолютно изолированным напорным пластом. Поэтому восстановление напоров во втором эксплуатируемом горизонте, можно полагать, будет не более 1–3 месяцев, что позволяет включать водозабор на нижний горизонт ежегодно.

В условиях же перетекания, когда водоотбор может привести к снижению уровней в вышележащей толще, полное восстановление напоров в общей многослойной водоносной системе может наступить теоретически лишь тогда, когда водоотбор будет уравновешен естественным питанием подземных вод. В результате этого воронка депрессии от водоотбора будет развиваться до тех пор, пока естественное питание на ее площади не станет равным водоотбору. Исходя из этой наиболее жесткой предпосылки, можно оценить сроки полного восполнения прогнозного водоотбора.

Учитывая зарегулированность эксплуатируемой водоносной системы, в качестве естественного питания подземных вод, по последним нашим оценкам может быть принят гарантированный среднемноголетний модуль подземного стока, равный как было показано выше для данного района  $3,5 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$ . Необходимая площадь воронки депрессии для обеспечения естественного восполнения соответствующего водоотбора, радиусы таких воронок и время их достижения, рассчитанное по формуле

$$t = \frac{R^2}{2,25 \cdot a} \text{ при } a \text{ в среднем } 10^6 \text{ м}^2/\text{сут, приведены в таблице 10.3.}$$

Таким образом, при водоотборе в  $6,72 \text{ м}^3/\text{сек}$  из горизонта III в течение месяца для полного восполнения запасов подземных вод потребуются максимум 256 суток, то есть менее года. В остальных случаях восполнение запасов будет проходить еще быстрее, что создает возможность осуществлять безболезненно подобные разовые сработки запасов подземных вод ежегодно. В реальных условиях восполнение сработанных запасов подземных вод будет осуществляться значительно быстрее. Факторами, способствующими этому, будут прежде всего уже отмеченные выше быстро восстанавливаемые упругие запасы, а также в меньшей мере возможный перехват поверхностного и подземного стока, снятие испарения при снижении уровней грунтовых вод с широко развитых в районе заболоченных территорий, отжатие воды из глинистых отложений. Кроме того, отмечаемое в последние годы увеличение питания подземных вод, связываемое с климатическими изменениями, привело к росту уровней и расходов подземных вод в данном регионе. Средний по северу Московской области градиент тренда межennaleго зимнего подземного стока составил  $0,07 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  в год, что привело к увеличению модуля зимнего стока за последние десятилетия более чем на  $1 \text{ л/сек} \cdot \text{км}^2$  по сравнению со среднемноголетним его значением по всему периоду наблюдений, а среднего-

Таблица 10.3

Зависимость времени восполнения срабатываемых запасов подземных вод от продолжительности и интенсивности водоотбора

| Время эксплуатации, сут | Прогнозный водоотбор, м <sup>3</sup> /сек | Необходимая площадь воронки депрессии (F), км <sup>2</sup> | Радиус воронки депрессии,* км | Время развития воронки, сут |
|-------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 30                      | 6,72                                      | 1920                                                       | 24                            | 256                         |
| 60                      | 4,03                                      | 1151                                                       | 19                            | 160                         |
| 90                      | 3,88                                      | 965                                                        | 17                            | 128                         |

\* радиус воронки депрессии  $R = \sqrt{F/\pi}$

дового модуля стока почти на 1,5 л/сек·км<sup>2</sup>. Исходя из этого, площади и радиусы воронок депрессии, а следовательно и время восполнения срабатываемых запасов подземных вод будут существенно сокращаться. Поэтому водоотбор подземных вод из обоих эксплуатируемых водоносных горизонтов размером около 8 м<sup>3</sup>/сек при сохранении подобных условий их питания может осуществляться в течение месяца ежегодно с гарантией полного восполнения срабатываемых запасов подземных вод до очередного возможного маловодного периода в следующем году.

Другим, как было отмечено выше, важным аспектом совместного использования поверхностных и подземных вод, является исключение или сведение к минимуму ущерба поверхностному стоку в процессе форсированной эксплуатации подземных вод. Водоотбор подземных вод в этом случае будет иметь смысл лишь тогда, когда ущерб стоку в период маловодья будет несоизмеримо мал по сравнению с таким водоотбором. Оптимальным такой ущерб можно принять не более 5% от поверхностного стока, что определяется точностью гидрологических измерений.

Расчет ущерба стоку в данном примере произведен по зависимости С.Я. Концевовского, Е.Л. Минкина [37] для трехслойного пласта:

$$V_{\text{ущ.}} = Q \left[ \operatorname{erfc} Z - \exp \left( \lambda + \frac{\lambda^2}{4Z^2} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left( Z + \frac{\lambda}{2Z} \right) \right]; \quad (10.3)$$

$$\text{где} \quad Z = \frac{l_0}{2\sqrt{a^*t}}; \quad \lambda = \frac{\left( \frac{T_1}{T_2} \right) \cdot l_0}{\left( 1 + \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \right) (B^* + \Delta L)}; \quad a^* = \frac{T_1 + T_2}{\mu + \mu_2};$$

$$B^* = \sqrt{\frac{T_1 \cdot T_2}{(T_1 + T_2) \cdot B_L}}; \quad B_L = \frac{k_0}{m_0}; \quad \Delta L = \sqrt{\frac{T_2 \cdot m_0}{k_0}}; \quad T_1 \text{ и } T_2 - \text{коэффициенты во-}$$

допроводимости верхнего и эксплуатируемого водоносного горизонтов. В качестве верхнего горизонта был принят объединенный четвертичный водоносный комплекс с суммарной средней водопроводимостью I и II водоносных горизонтов, м<sup>2</sup>/сут;  $\mu$  и  $\mu_2$  – гравитационная водоотдача верхнего и упругая водоотдача пород эксплуатируемого III водоносного горизонта;  $k_0$  и  $m_0$  – коэффициент фильтрации и мощность наиболее слабо проницаемого слоя, перекрывающего эксплуатируемый водоносный горизонт, м/сут и м соответственно;  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты уровне- и пье-

зопроводности верхнего и нижнего слоя,  $\text{м}^2/\text{сут}$ ;  $l_0$  – расстояние до уреза водохранилища, м.

В силу высокой изолированности основного эксплуатационного горизонта от вышележащих водоносных горизонтов и поверхностных вод параметр несовершенства гидравлической связи поверхностных и подземных вод  $\Delta L$  превысил 20 км, а ущерб стоку при 30 сутках эксплуатации составил менее 0,1%, при 60 сутках – около 0,2% и при 90 сутках – 0,3% от водоотбора. Такой ущерб можно признать практически незначимым.

Водозабор, подобный разведанному, может быть при необходимости продлен вдоль водохранилища на запад, и за счет этого его производительность может быть удвоена и даже утроена. В итоге, даже если сохранить разведанный водозабор для его исходного предназначения (для водоснабжения г. Конаково), аналогичный новый водозабор может быть сооружен на западном продолжении разведанного, где также можно будет получить около 8  $\text{м}^3/\text{сек}$  при продолжительности водоотбора в течение месяца или около 5  $\text{м}^3/\text{сек}$  в течение 2 месяцев и гарантией ежегодного восполнения сработанных запасов подземных вод. Увеличение производительности водоотбора и продолжительности его работы по сравнению с оцененными вариантами не целесообразно. Восполнение запасов при этом будет осуществляться за сроки соизмеримые с годом, а гарантировать, что в последующем году не наступит вновь маловодный дефицитный год, метеорологическая наука пока не в состоянии.

Выполненные таким образом оценки позволяют сформулировать пожелания по оптимальному режиму управления водохранилищем, обеспечивающим возможность появления дефицитных периодов продолжительностью не более 1–3 месяцев ежегодно, что позволит нарастить водоотдачу водохранилища на 4–8  $\text{м}^3/\text{сек}$ . При большей продолжительности маловодных серий прирост водоотдачи существенно сокращается.

Анализ многолетних рядов наблюдений по Ивановскому водохранилищу [53], показал, что при 80% среднемесячной водоотдаче при современном диспетчерском графике работы водохранилища могут возникать дефициты, достигающие в годовом разрезе 530  $\text{м}^3/\text{сек}$  или по 53  $\text{м}^3/\text{сек}$  в течение 10 месяцев. Таким исключительно редким маловодным периодом оказалась межень 1921–1922 годов. Однако и некоторые другие маловодные периоды (1964–1965 и 1939–1940) также содержали дефициты, достигающие 28  $\text{м}^3/\text{сек}$  в течение 1 месяца или в среднем по 36,6  $\text{м}^3/\text{сек}$  в течение 3 месяцев. Покрыть такие дефициты форсированной эксплуатацией подземных вод невозможно. Поэтому возникает проблема изменения диспетчерского графика работы водохранилища с учетом

указанных возможностей водоотбора подземных вод, то есть с сокращением продолжительностей маловодных периодов до 1–3 месяцев и глубины перебоев (дефицита) не более 8 м<sup>3</sup>/сек.

Подобная задача по разработке диспетчерского графика режима Ивановского водохранилища с целью снижения продолжительности маловодных периодов была осуществлена Ю. Фуляном [69], под руководством А.В. Великанова, что позволило им обосновать возможность увеличения гарантированной отдачи Верхневолжской водохозяйственной системы за счет совместного использования поверхностных и подземных вод с 78 до 86 м<sup>3</sup>/сек и повышения тем самым надежности водообеспечения системы на 10%.

При этом следует подчеркнуть, что режим работы Ивановского водохранилища рассматривается на сегодня настолько напряженным, что изъять из него круглогодично 0,6 м<sup>3</sup>/сек для водоснабжения г. Конаково считалось невозможным, хотя город располагается на берегу водохранилища. Приведенные же оценки показали, что при предлагаемом режиме эксплуатации можно не только обеспечить потребность Конакова за счет вод водохранилища, но и увеличить одновременно водоподачу в Москву на 7,4 м<sup>3</sup>/сек.

Создание такого компенсационного водозабора в районе водохранилища может обеспечить водоснабжение г. Конаково и на период возможного случайного загрязнения или заражения водохранилища. В этом случае водозабор может быть переключен непосредственно только на водоснабжение города, что обеспечит его подземными водами гарантированного питьевого качества, практически не связанного с водохранилищем. Подобный режим водоснабжения города может просуществовать до тех пор пока не произойдет самоочищение вод водохранилища естественным стоком.

Полученные оценки надежности восполнения запасов подземных вод при незначимых ущербах стоку в каждом из принятых вариантов могут поставить вопрос о выборе оптимального режима водоотбора. Так, при меньшем водоотборе, но большей его продолжительности можно получить в 1,5 раза больший объем дополнительной воды, аккумулируемой в водохранилище (табл. 10.4).

Одновременно при увеличении продолжительности водоотбора и уменьшении производительности водозабора можно пропорционально сократить число эксплуатационных скважин, т.е. сделать водозабор более компактным и экономичным. Однако этот вопрос должен решаться как на основе экономических расчетов, так и прежде всего на основе разработки рационального режима управления водохранилищем, т.е. созда-

Таблица 10.4

**Зависимость объема откачиваемой воды от продолжительности водоотбора  
с проектной по вариантам производительностью**

| Продолжительность водоотбора, сут | Производительность водозабора, м <sup>3</sup> /сек | Суммарный объем откаченной воды, млн м <sup>3</sup> |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 30                                | 7,95                                               | 206                                                 |
| 60                                | 4,8                                                | 245                                                 |
| 90                                | 4,8                                                | 327                                                 |

ния соответствующего диспетчерского графика работы водохранилища с минимальными потерями стока.

О масштабах возможных изменений в водном балансе водохранилища можно судить по соотношению площадей водосбора Иваньковского водохранилища и максимально возможной воронки депрессии водозабора. Так, площадь воронки, где будет перехватываться подземный сток, даже если не учитывать стабилизирующую роль перетекания, может достигнуть максимум 1920 км<sup>2</sup> (см. табл.10.3). Площадь водосбора водохранилища составляет 41000 км<sup>2</sup>, т.е. более чем в 20 раз больше площади перехватываемого питания подземных вод. Если же учесть, что реальная воронка депрессии будет на порядок меньше и что подземное питание рек составляет лишь около 25–30% от поверхностного стока, то станет очевидным, что планируемый водоотбор окажется в пределах точности (<5%) оценок общего водного баланса водохранилища.

Оценка функционирования предполагаемой системы совместного использования поверхностных и подземных вод в районе Иваньковского водохранилища с экологических позиций показала, что никаких сколько-нибудь заметных негативных последствий в окружающей среде она не вызовет. Ущерб речному стоку в период маловодья, как было показано выше, пренебрежимо малы, уровни напорных вод при периодическом водоотборе будут восстанавливаться довольно быстро, что не сможет реально сказаться на экосистемах и других природных процессах. Режим грунтовых вод и влаги в зоне аэрации также не изменится, что важно для наземных экосистем. Произойдет лишь некоторое перераспределение во времени подземного питания водохранилища, т.е. повысится его водность в маловодные периоды и пропорционально снизится водность в многоводные периоды, что не скажется на его суммарном годовом водном балансе. Экологические преимущества подобных систем совместного использования поверхностных и подземных вод рассматривались и в ряде других работ [41, 54].

Экономической оценки реализации подобной системы совместного использования поверхностных и подземных вод для данного примера пока не делалось, т.к. каких-либо других альтернативных решений получения дополнительного источника водоснабжения в данном районе нет. В замыкающем створе Иваньковского створа фиксируются все водные ресурсы региона и здесь может ставиться вопрос лишь о их перераспределении во времени, что и предусматривают выполненные расчеты.

Сопоставление альтернативных вариантов может возникнуть лишь при решении проблемы водоснабжения Москвы и области в целом, при которых наравне с Иваньковским водохранилищем могут анализироваться различные водоисточники. Однако эта задача нами здесь не ставилась.

Экономический же выигрыш от совместного использования поверхностных и подземных вод в виде увеличения отдачи водохранилища на  $8 \text{ м}^3/\text{сек}$  очевиден. Опыт такой оценки позволяет предположить, что использование таких систем и на других участках (как в долинах малых рек, так и в районах других питьевых водохранилищ) может вполне решить проблему водоснабжения Москвы в будущем.

Аналогичные компенсационные водозаборы, к примеру, могут быть созданы и вдоль канала им. Москвы в пределах так называемого водораздельного бьефа. Как уже отмечалось выше, в состав водораздельного бьефа входит 6 водохранилищ: Икшинское, Пестовское, Пяловское, Акуловское (Учинское), Клязьминское и Химкинское. Полный объем этих взаимосвязанных водохранилищ изменяется от 15 млн  $\text{м}^3$  для Икшинского и до 146 млн  $\text{м}^3$  для Учинского, а полезный объем – от 6 млн  $\text{м}^3$  для Химкинского до 50 млн  $\text{м}^3$  для Учинского водохранилищ. Водохранилища имеют комплексное назначение – для санитарного обводнения рек Москвы, Яузы, Учи, Клязьмы, Лихоборки, обеспечения работы шлюзов, поддержания необходимых глубин для судоходства, рекреации, выработки электроэнергии и главное – для водоснабжения Москвы. Регулирующая роль водохранилищ не велика – всего  $3,3 \text{ м}^3/\text{сек}$ . В основном они проточны и возникающие в них дефициты определяются дефицитами Иваньковского водохранилища. В этой связи режим работы компенсационных водозаборов в районе этих водохранилищ должен увязываться с общей задачей погашения дефицитов Верхневолжского источника водоснабжения в целом.

Наиболее перспективным для размещения компенсационного водозабора представляется район Икшинского водохранилища. Этот район располагается за пределами региональной воронки депрессии в каменноугольных водоносных горизонтах и не достаточным удалении от планируемых крупных водозаборов в бассейнах рек Дубна, Веля, Сестра,

Воря, а также Вязь и Серебрянка. Существующие в районе водозаборы незначительны по водоотбору (Икша – 32 тыс. м<sup>3</sup>, Деденево – 6 тыс. м<sup>3</sup>/сут).

Основным продуктивным водоносным горизонтом в данном районе является верхнегжельский – турабьевский и кутузовско-ногинский горизонты, залегающие на глубине около 100 м над толщей песчано-глинистых водноледниковых отложений ниже- и среднечетвертичного возраста. Юрские глины здесь местами эродированы ледником и поэтому верхний четвертичный водоносный комплекс гидравлически взаимосвязан с основным каменноугольным. Однако значительная мощность верхнего комплекса и преобладающее суглинистое его строение определяют достаточную изолированность каменноугольного горизонта от поверхностных вод, исключаящую сколько-нибудь заметный ущерб стоку при относительно кратковременной (до 2–3 месяцев) эксплуатации подземных вод.

Суммарная водопроводимость верхнегжельского водоносного горизонта достигнет здесь 2000 м<sup>3</sup>/сут, а коэффициент пьезопроводности – около  $4 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/сут. Приняв радиус обобщенного линейного водозабора  $R_2 = 1000$  м и допустимое понижение в 80 м, можно получить производительность водозабора для условий неограниченного напорного пласта в следующих пределах (табл. 10.5).

Как видно из результатов расчетов, при наличии двух водозаборов (данного и Конаковского) становится возможным гасить дефициты в водоподаче Москве от 10 до 17 м<sup>3</sup>/сек ежегодно. Радиус влияния водозабора не превысит 9 км, что исключит его воздействие на работу соседних водозаборов. Условия восполнения запасов на данном участке будут аналогичными выше охарактеризованным. При этом будут частично перехвачены и как бы возвращены фильтрационные потери из канала.

Принципиально возможным является размещение компенсационного водозабора в любом месте вдоль канала. Однако условия для восполнения запасов подземных вод будут намного лучше в районе водохрани-

Таблица 10.5

Зависимость производительности водозабора от продолжительности водоотбора

| Продолжительность водоотбора, сут | Производительность водозабора |                     | Радиус влияния, км |
|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------|
|                                   | тыс. м <sup>3</sup> /сут      | м <sup>3</sup> /сек |                    |
| 30                                | 806,5                         | 9,35                | 5                  |
| 60                                | 591                           | 6,85                | 7,3                |
| 90                                | 529                           | 6,2                 | 9                  |



лиц с большой инфильтрующей площадью, то есть из водохранилища в сформировавшуюся под ним воронку депрессии.

Сброс откачиваемых вод в любом случае осуществляется в водохранилище или канал, т.к. и та, и другая вода имеют питьевое предназначение и на конечном этапе пройдут требуемую и осуществляемую водоподготовку. Расходы на трубопроводы при этом становятся минимальными.

Таким образом совместное использование поверхностных и подземных вод в районе Ивановского водохранилища и канала Волга–Москва открывает перспективы увеличения водоподачи в Москву до 90–100 м<sup>3</sup>/сут, т.е. на 20%, что может оказаться вполне достаточным городу на довольно отдаленную перспективу и особенно в маловодные годы. Для этого необходимо составить соответствующий диспетчерский график управления режимом работы Ивановского водохранилища и обосновать при этом оптимальный режим работы компенсационных водозаборов.

В ряде случаев неменьшие возможности для водоснабжения могут создать зарегулированные реки вне пределов водохранилищ.

В качестве такой типичной зарегулированной реки можно рассмотреть р. Клязьму. Еще при строительстве канала Волга–Москва эта река почти в самом ее верховье была пересечена каналом и в ее долине было создано Клязьминское и Учинское водохранилища, которые перехватывают естественный сток реки, поступающий затем по каналу в Москву. Одновременно через Учинскую плотину вниз по долине Клязьмы сбрасывается из этих водохранилищ практически уже только волжская вода. Эти попуски объемом около 5 м<sup>3</sup>/сек можно считать истоком новой Клязьмы. До существующего гидроствора в г. Павловский Посад река принимает серию притоков слева и справа (Воря, Шерна и другие более мелкие), которые как бы восстанавливают зональные черты внутригодового режима стока.

Вместе с тем, как было показано на примере р. Вори, режим и этих рек техногенно нарушен и поэтому наблюдаемый режим р. Клязьмы не только зарегулирован изначально, но и сильно искажен. В результате, как в меженном, так и среднегодовом стоке даже визуальнo проматриваются четкие многолетние близкие к линейным тренды (рис. 10.1). Установить генезис этих трендов трудно. Можно лишь предположить, что в их основе лежит как наращивание попусков из водохранилищ для оздоровления бассейна реки, так и главным образом наращивание сброса возвратных вод с увеличением водопотребления в бассейне за счет эксплуатации глубоких водоносных горизонтов.

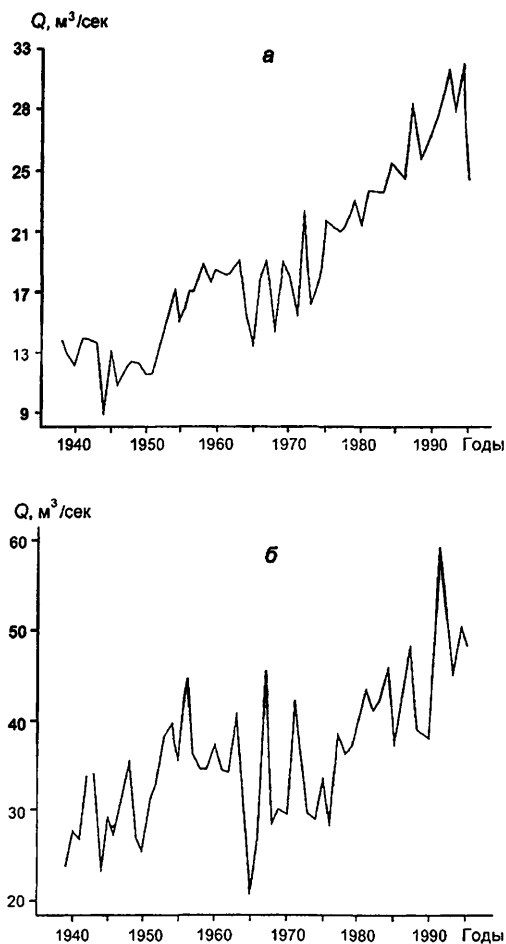


Рис. 10.1. Хронологические графики минимальных среднемесячных (а) и среднегодовых (б) расходов р. Клязьмы

Вклад имеющихся изменений в атмосферных осадках вряд ли может быть здесь замечен на фоне отмеченных более мощных воздействий техногенных факторов.

В настоящее время в бассейне Клязьмы за счет подземных вод обеспечивается водоснабжение около 20 городов и поселков с суммарным водоотбором около  $10 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Среди таковых Щелково, Ивантеевка, Пушкино, Калининград, Черноголовка, Ногинск, Шатура, Балашиха, Электросталь, Рошаль и др. Явное преобладание сбрасываемых в реки возвратных вод над перехватом поверхностного стока при эксплуатации подземных вод свидетельствует об отсутствии стабилизации уровней эксплуатируемых горизонтов и имеющейся тенденции к истощению запасов подземных вод в данном районе. В тоже время, за период имеющихся наблюдений с 1937 по 1995 гг. меженные расходы возросли более чем в 2 раза с 10–12 м<sup>3</sup>/сек до 26–30 м<sup>3</sup>/сек, а среднегодовые значения стока с 24–26 м<sup>3</sup>/сек до 37–48 м<sup>3</sup>/сек.

Долина Клязьмы с ее притоками перспективна для организации крупных централизованных водозаборов. Поэтому здесь планируется создать серию новых водозаборов и в связи с этим ведутся разведки и оцениваются запасы подземных вод по ряду месторождений подземных вод. В том числе на Верхней Клязьме (реки Серебрянка, Вязь, Воря) по данным ПГО Центргеология и ГИДЕКа планируется отбирать 3,26 м<sup>3</sup>/сек, на р. Шерне – 1,74 м<sup>3</sup>/сек и на Средней Клязьме (поселки Барсково, Покров и Костарево) – 5,34 м<sup>3</sup>/сек. Всего 10,34 м<sup>3</sup>/сек. На базе этих месторождений планируется обеспечить потребность в питьевой воде на перспективу 16 городов, включая Павловский Посад, Ногинск, Электросталь, Электроугли, Железнодорожный, Фрязино, Щелково, Мытищи-1, Старая Купавна, Балашиха, Реутов, Люберцы, Дзержинский, Лыткарино, Галицино, а также подать часть воды в Москву.

Некоторые из этих городов на сегодня либо практически сработали свои запасы подземных вод, либо используемые подземные воды уже настолько загрязнены (Щелково, Акрихин, Ногинск, Электросталь), что требуется неотложное изыскание новых источников водоснабжения.

В том числе понижение уровней на водозаборах Сергиева Посада достигли 70–87 м, Мытищ и Фрязино – 70–75 м, Люберец – 95 м, Ивантеевки и Орехово-Зуева – 40–42 м, Рошали – 30 м, Ногинска и Электроуглей – 45–60 м. При этом в Ногинске, Электростали, Балашихе, Щелково, Фрязино, с. Купавне, Ивантеевке, Железнодорожном и Мытищах уже идет осушение эксплуатируемого пласта.

Вместе с тем создание планируемых новых водозаборов на подземные воды неизбежно приведет к формированию значительной региональной воронки депрессии и усилению тенденции к истощению запасов подземных вод. Все это создает предпосылки для предпочтительности внедрения здесь систем совместного использования поверхностных и подземных вод, исключающих нерациональную сработку запасов подземных вод. К примеру, решение данной проблемы в целом может быть

обеспечено за счет создания подобной системы где-либо на отрезке реки между Павловским Посадом и Ногинском.

Начиная с 1974 г., то есть более 20 лет подряд, расход реки в межень на данном отрезке устойчиво превышает 20 м<sup>3</sup>/сек. Поэтому требуемый для Восточной системы суммарный расход 10,34 м<sup>3</sup>/сек, перехватываемый тем или иным способом, составит лишь половину меженного расхода реки и не сможет причинить экологии и окружающей среде какого-либо заметного ущерба. При этом при таком водоотборе пока даже не требуется создавать компенсационный водозабор. Таковой мог бы потребоваться лишь при отборе в 23–25 м<sup>3</sup>/сек, в чем пока нет никакой необходимости.

Гидрогеологические условия в долине Клязьмы на данном отрезке благоприятны для создания инфильтрационного водозабора. Каменноугольные водоносные горизонты залегают здесь не глубоко и местами даже выходят на поверхность. Во многих местах они перекрыты лишь песчаными отложениями четвертичного возраста и мезозоя. Юрские глины здесь имеют наименьшую мощность (до 10 м) и на значительной части территории полностью размыты, что создает благоприятные условия взаимосвязи каменноугольных горизонтов с четвертичными отложениями и рекой. Возможность перехвата такого количества поверхностного стока инфильтрационным водозабором будет зависеть лишь от пропускной способности ложа реки. При значительном сопротивлении русловых отложений возможно потребуется принятие каких-либо инженерных решений. В качестве таковых может рассматриваться периодическое рыление ложа реки при его заилении, дноуглубительные работы с выемкой слабопроницаемых русловых фаций до более проницаемого базального горизонта аллювия, создание инфильтрационных бассейнов и поглощающих колодцев для искусственного восполнения запасов подземных вод и др. В крайнем случае при недостаточной эффективности этих мер наряду с водозабором на подземные воды возможен непосредственный отбор поверхностного стока с соответствующей водоподготовкой.

Целесообразность такого регионального централизованного водозабора должна определяться в конечном счете технико-экономическими расчетами, т.к. в ряде случаев возможно более выгодным может оказаться сооружение отдельных менее производительных водозаборов, но ближе к конкретным потребителям, чем создание единой мощной региональной водохозяйственной системы.

Перспективность таких малых систем показана выше на примере бассейнов рек Ламы, Москвы, Вори и др.

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что системы совместного использования поверхностных и подземных вод еще более перспективны в бассейнах зарегулированных рек и особенно в районах водохранилищ питьевого назначения по сравнению с долинами незарегулированных малых рек. Преимущества таких районов заключаются прежде всего в том, что в данном случае появляется возможность максимального использования запасов подземных вод в маловодные периоды, т.е. с полной сработкой напоров. В долинах малых рек, как было показано в главе 8, водоотбор подземных вод нередко ограничивался неуправляемой случайной продолжительностью дефицитного периода и необходимостью обеспечить восполнение сработанных запасов до очередной маловодной серии. В результате запасы подземных вод глубоких горизонтов в маловодные годы рассчитывались на сработку лишь на 30–50%. В районах же водохранилищ можно управлять продолжительностью маловодных серий, что и открывает более широкие возможности для более полного использования запасов подземных вод.

Другим преимуществом районов водохранилищ является отсутствие необходимости создавать здесь два водозабора – основного и компенсационного. Наличие регулирующей емкости и организованной системы водоподдачи потребителю позволяет сооружать здесь лишь один компенсационный водозабор, что повышает экономичность системы в целом. Более того, располагая компенсационным водозабором вдоль водохранилища, можно обойтись без значительных трубопроводов, сбрасывая откачиваемую воду прямо в водохранилище, используя его как естественный водовод, что еще более повышает экономичность системы.

И, наконец, наиболее существенным преимуществом зарегулированных рек являются их значительно более высокие по сравнению с природными меженные расходы. Примером тому могут служить и р. Волга в районе Иваньково и р. Клязьма и р. Москва. Все это позволяет создавать в долинах зарегулированных рек высокопродуктивные системы совместного использования поверхностных и подземных вод, способные решать проблемы водоснабжения крупных городов и промышленных агломераций.

---

---

## *Глава 11*

# **ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ПОГАШЕНИЯ ДЕФИЦИТОВ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

Как известно, в соответствии с целевой комплексной программой Мосводоканала, решение проблемы водообеспечения Москвы и Московского региона в целом связывается с созданием на периферии области четырех крупных водозаборных межрайонных систем, обеспечивающих подземной водой как малые города и поселки вдоль трассы водоводов, так и столицу. В числе таких областных межрайонных систем водоснабжения рассматриваются:

1. Южная, базирующаяся на Приокском месторождении подземных вод.
2. Восточная, базирующаяся на Верхне- и Среднеклязьминском, Шернинском и Мещерском месторождениях.
3. Северная, базирующаяся на Дубнинских, Вельских и Сестринском месторождениях.
4. Западная, базирующаяся на Звенигородском месторождении подземных вод.

К каждой из таких систем будут подключаться прежде всего города, запасы подземных вод в которых либо уже истощены, либо находятся на грани истощения и не обеспечивают заявленную потребность в воде, либо загрязнены. В том числе к Южной системе планируется подключить Видное, Домодедово, Щербинку, Подольск, Климовск, Белые Столбы, Львовский Столбовую, Чехов, Ступино, Балабаново, а также зоны отдыха

Подольского, Серпуховского, Домодевского и Чеховского районов. К Восточной системе будут подключены Павловский Посад, Ногинск, Электросталь, Электроугли, Железнодорожный, Фрязино, Щелково, Мытищи, Купавна, Балашиха, Реутов, Люберцы, Дзержинский, Лыткарино, Томилино, Котельники, Акрихин. К Северной системе планируется подключить Клин, Химки, Долгопрудный, Лобню и Шереметьево, а к Западной – Одинцово, Голицино, Троицк, Апрелевку и Звенигород. Всего по предварительным оценкам с Южной системы планируется получить 15 м<sup>3</sup>/сек, в том числе для Москвы 10,96 м<sup>3</sup>/сек и области 4,06 м<sup>3</sup>/сек; с Северной системы 8,7 м<sup>3</sup>/сек, в том числе для Москвы – 7,3 м<sup>3</sup>/сек и 1,4 м<sup>3</sup>/сек для области, а также только для области с Западной и Восточной систем соответственно по 1,6 м<sup>3</sup>/сек и 5 м<sup>3</sup>/сек.

На первом этапе каждая из таких систем, как предполагается, будет функционировать самостоятельно, а в будущем не исключается их заkolцевание по принципу единой энергетической системы, что позволит гасить дефициты в воде одних систем за счет других, более обеспеченных на тот или иной момент времени. Принципы функционирования такой единой системы пока не рассматривались. Генеральной идеей в создании подобных межрайонных систем водоснабжения является обеспечение населения Москвы и районных городов области качественной питьевой водой прежде всего из подземных источников, обладающих более высокой природной защищенностью от возможных загрязнений по сравнению с поверхностными водами.

Выполненные геологическим управлением разведки и осуществленные им совместно с ГИДЭК оценки запасов подземных вод по указанным месторождениям подземных вод показали реальную возможность решения данной задачи. Вместе с тем, в ряде случаев пришлось столкнуться прежде всего с экологическими и другими проблемами, осложняющими использование подземных вод и ограничивающими возможное наращивание водоотбора. Примеры негативных последствий в окружающей среде, вызываемых непрерывной интенсивной эксплуатацией подземных вод отмечались ранее [29], в том числе и применительно к Московскому региону.

В этой связи представляется важным рассмотреть перспективность внедрения систем совместного использования поверхностных и подземных вод и как возможную альтернативу решения проблемы водообеспечения Московского региона и как дополнительный вариант к принятой системе, позволяющий увеличить возможный водоотбор и обеспечить население водой в особый период. При этом рассматриваемый способ не противоречит отмеченной выше генеральной идее в ставке на подземные

воды, т.к. и основной – инфильтрационный и компенсационный водозаборы закладываются на подземные воды. Однако при этом исключаются основные негативные последствия в среде и достигается несомненный выигрыш в возможном водоотборе с часто многократным увеличением коэффициента использования водных ресурсов региона.

К альтернативным решениям можно отнести создание прежде всего систем совместного использования поверхностных и подземных вод на малых реках. Как было показано выше, даже на реках с минимальным меженным стоком порядка  $1 \text{ м}^3/\text{сек}$  можно создать такую систему, обеспечивающую за счет местных источников потребность в воде малых городов с населением до 100 тысяч и даже более. Это позволит сократить количество городов, которые безвариантно придется снабжать из централизованных водозаборов в силу отсутствия таких рек или крайне низкого качества их воды.

В качестве дополнительного варианта, направленного на увеличение использования поверхностных и подземных вод, может рассматривать также периодическое использование подземных вод существующими водозаборами для погашения дефицитов стока в маловодные периоды. Особенности такого периодического водоотбора можно продемонстрировать на примере Южной межрайонной системы водоснабжения.

Как известно, в соответствии с последними работами по оценке эксплуатационных запасов подземных вод по Приокскому месторождению была показана принципиальная возможность водоотбора в целом  $19,3 \text{ м}^3/\text{сек}$ , в том числе для Южной системы –  $13,9 \text{ м}^3/\text{сек}$ . При этом к балансовым, подготовленным к освоению запасам, было отнесено лишь  $5,8 \text{ м}^3/\text{сек}$  по одному Прилуцкому участку. Связано это, как уже отмечалось выше, с тем, что при полном отборе всех установленных запасов подземных вод произойдет снижение уровня воды р. Оки в межень до 15–20 см. При отборе  $5,8 \text{ м}^3/\text{сек}$  такое снижение уровней не должно превысить 5–10 см, что в итоге не сможет ухудшить реально условия судоходства по реке в маловодные периоды. По этой причине не получили необходимые согласования даже утвержденные по высоким категориям запасы по Ступинскому участку ( $3,99 \text{ м}^3/\text{сек}$ ).

По более ранним изысканиям перспективы Приокского месторождения подземных вод оценивались даже в  $24,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ , включая все существующие действующие и проектные участки левого берега (Лужковский, Зиброво-Никифоровский, Прилуцкий западный, Лужковско-Тоденский, Тоденско-Зибровский, Прилуцкий восточный), а также водозаборные участки правого берега Оки (Лукияновский, Пущинский городской, Пущинский, Макаровский, Каширский западный и восточный).



Меженный среднемесячный расход реки для года 95% обеспеченности составляет  $60 \text{ м}^3/\text{сек}$ , что позволяет в принципе отбирать и  $13,9 \text{ м}^3/\text{сек}$  и  $24,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а абсолютный минимум  $57 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Однако при этом снижение уровней воды в реке окажется более допустимых пределов.

Решение проблемы наращивания водоотбора на Приокском месторождении может связываться либо с регулированием стока реки, т.е. с сооружением хотя бы низконапорной плотины и водохранилища, либо с комбинированным использованием поверхностных и подземных вод.

Принципиальная схема работы такой системы аналогична вышеописанным примерам. В многоводные периоды года водозаборы Приокского месторождения могут работать с проектной производительностью (либо  $9,9 \text{ м}^3/\text{сек}$  – в соответствии с разведанными и оцененными по высоким категориям запасам, либо даже  $13,9 \text{ м}^3/\text{сек}$  – в соответствии с заявленной потребностью и оцененными перспективными эксплуатационными запасами подземных вод. В маловодные периоды водозабор сокращает производительность до согласованных пределов ( $5,8 \text{ м}^3/\text{сек}$ ), исключая тем самым снижение уровней воды в реке ниже критического, а возникающий при этом дефицит покрывается периодической эксплуатацией подземных вод за пределами месторождения, не нанося ущерба стоку реки. Для этой цели могут использоваться водозаборы тех городов, которые подключаются к магистральному водоводу и будут поэтому отключены. В настоящее время предусматривается или возможно подключение к магистральному водопроводу не менее 15 перечисленных выше городов, поселков и зон отдыха. В большинстве из них запасы подземных вод либо находятся на грани истощения либо уже практически истощены, т.к. напоры горизонтов сработаны. Поэтому в любом случае такие водозаборы должны отключаться и водоснабжение этих городов и поселков должно переориентироваться на магистральный водопровод Ока–Москва. Отключение водозаборов приведет к восстановлению напоров, что со временем создаст условия для повторного их периодического кратковременного включения в дефицитные периоды. Никаких дополнительных экономических затрат такое подключение не вызовет.

Даже если разделить максимально возможный дефицит в  $8,1 \text{ м}^3/\text{сек}$  на 10 наиболее крупных водозаборов в городах Подольск, Видное, Щербинка, Домодедово, Троицк, Климовск, Чехов, Барыбино, Львовский и Востряково, то средняя нагрузка на водозабор составит  $0,8 \text{ м}^3/\text{сек}$  или около 69 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ .

Анализ наиболее маловодных лет (1921–1922 и 1939–1940 гг.) показывает, что даже в такие самые маловодные годы могут возникнуть дефицитные периоды продолжительностью лишь до 2–3 месяцев (рис.11.1).

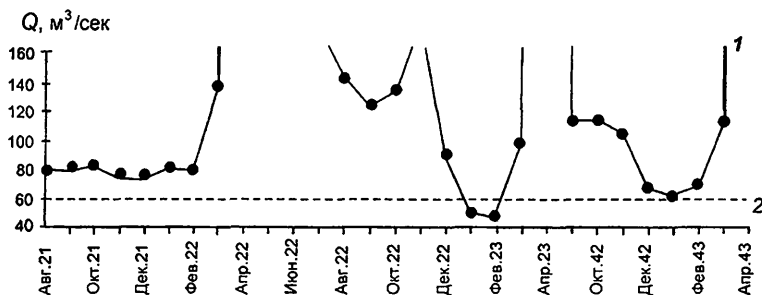


Рис. 11.1. Фрагмент хронологического графика р. Оки

1 – расход реки; 2 – минимальное среднее месячное значение расхода реки 95% обеспеченности (60 м³/сек)

В современных условиях, то есть при наметившемся тренде в подземном стоке в бассейне р. Оки, условия для гарантированности подобного водоотбора существенно возросли (рис. 11.2).

Расчетное понижение срабатываемых за 3 месяца напоров при подобной средней производительности водозабора и следующих расчетных параметрах ( $km = 1000 \text{ м}^3/\text{сут}$ ,  $a = 10^6 \text{ м}^3/\text{сут}$ ,  $R_0 = 1000 \text{ м}$ ) составит 29 м. При среднегодовом модуле питания подземных вод в  $3 \text{ л}/\text{сек} \cdot \text{км}^2$  восполнение срабатываемых запасов может ежегодно осуществляться с площади воронки депрессии радиусом в 9,2 км, а радиус возможного развития воронки депрессии за время работы водозабора не превысит 14 км. Поэтому, т.к. все эти города расположены друг от друга на достаточно больших расстояниях, взаимодействие таких водозаборов при периодическом и кратковременном их включении исключается, а восполнение запасов подземных вод, как было показано выше, будет гарантированным даже если все такие водозаборы будут включаться ежегодно. В реальных условиях, в силу наличия перетекания, восполнения форсированно срабатываемых запасов подземных вод будет более обеспеченным, а радиус воронки депрессии будет еще меньше. В большинстве случаев расчетное понижение будет находиться в пределах допустимого. Однако, даже если в отдельных случаях кратковременно произойдет осушение верхней части водоносного горизонта, ничего катастрофического, как показывает опыт, не случится. При подключении к системе большего количества водозаборов требуемая средняя их производительность соответственно уменьшится. Современный непрерывный водоотбор по ряду водозаборов этой части области соизмерим с средним расчетным (Раменское –

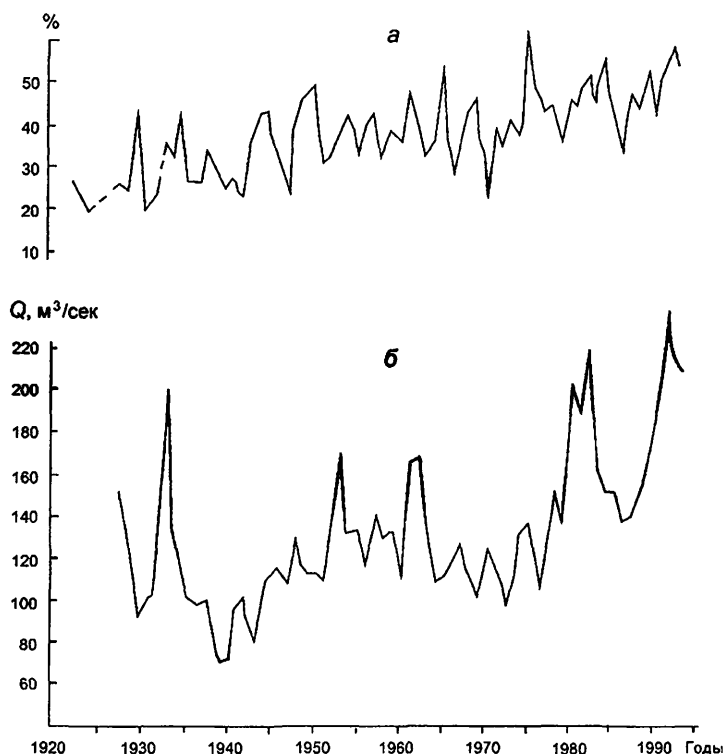


Рис. 11.2. графики колебаний коэффициентов подземного стока (а) и среднего за год (б) подземного стока в р. Ока (пост Кашира)

74 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ , Жуковский – 53 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ , Домодедово – 81 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ , Подольск – 147 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ , Климовск – 35 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ ). Все это позволяет оценивать форсированный периодический за 3 месяца водоотбор вполне реальным.

Таким образом, Приокское месторождение может быть ориентировано к освоению по меньшей мере до 8  $\text{м}^3/\text{сек}$  уже сейчас. Перспективная потребность в хозяйственно-питьевой воде малых городов по трассе Южной системы не превышает в сумме 2–3  $\text{м}^3/\text{сут}$ . Поэтому даже в тех случаях, когда их местные водозаборы еще не исчерпали полностью своих возможностей и ранее планировалось все еще удовлетворять потребность городов частично за счет местных ресурсов и частично за счет межрегио-

нальной системы, при внедрении комбинированного использования ресурсов вся потребность городов может быть удовлетворена только за счет магистрального водовода и большая часть производительности останется для Москвы. Местные же водозаборы этих городов останутся лишь резервными, периодически включаемыми для покрытия дефицитов стока в отдельные маловодные годы.

Аналогичным образом может быть решена проблема наиболее полного и гарантированного водоснабжения серии городов, подключаемых к Восточной межрайонной системе водоснабжения. Более того Южная и Восточная системы могут быть легко соединены в районе Видное–Лыткарино–Люберцы. Поэтому при недостатке воды в Южной системе для погашения дефицита может включаться Люберецкий водозабор, входящий в Восточную систему, а при недостатке воды в Восточной системе, наоборот, – водозаборы, входящие в Южную систему.

Подобное закольцовывание межрайонных водохозяйственных систем позволит в будущем рассматривать и другие варианты повышения коэффициента использования водных ресурсов. Так, например, для снижения дефицитов стока в Клязьме в целях повышения меженных расходов реки и сокращения продолжительности дефицитных периодов могут увеличиваться периодически попуски из Клязьминского водохранилища. Размер этих пусков в свою очередь в случае необходимости можно компенсировать за счет периодического включения компенсационных водозаборов, сооружаемых на канале, способных, как было показано выше, дать до  $6,2 \text{ м}^3/\text{сут}$  в течение 3 месяцев. Аналогичный компенсационный водозабор может быть сооружен и на р. Шерне. Сток Дубны также может быть сброшен в канал по отрезку р. Сестры, что повысит расход канала и перспективы Восточной системы. Таким образом, если потребуется вполне реально и эффективно могут быть «закольцованы» Южная, Восточная и Северная системы.

При наличии достаточно надежных региональных водоупоров, разделяющих первый и второй напорные горизонты, основной и компенсационный водозаборы могут и не разноситься в пространстве для исключения их взаимодействия. Более того эксплуатационные скважины того и другого водозаборов могут быть объединены в одни узлы, например, по 2–3 скважины на верхний, связанный с рекой горизонт, а одну-две на нижний, не взаимодействующий с верхним в пределах ограниченного срока эксплуатации. В этом случае последние скважины могут рассматриваться как обычные резервные скважины водозабора, которые в случае необходимости могут использоваться и как резервные (при ремонтных работах на водозаборе) но главным образом будут использоваться в

качестве компенсационного водозабора. Подобная конструкция водозаборов имеет очевидные экономические преимущества.

Внедрение систем комбинированного использования поверхностных и подземных вод может также повысить эффективность использования местных водных ресурсов Москворецкой системы водоснабжения Москвы, повысить ее суммарную отдачу, снизить сезонную неравномерность возможного водоотбора и улучшить тем самым промывной режим р. Москвы и экологическую обстановку в реке ниже города.

Москворецкая система представляет, как известно, серию малых водохранилищ, регулирующих сток в бассейне (рис.11.3). Все водохранилища системы относятся к водохранилищам многолетнего регулирования. Характеристики этих водохранилищ можно иллюстрировать таблицей 11.1.

Суммарный полезный объем всех водохранилищ составляет 1309 млн м<sup>3</sup>. Если исключить в среднем двухмесячный многоводный паводковый период, за который проходит до 40–50% стока, то за 10 маловодных месяцев из всех водохранилищ можно было бы подавать в систему без учета испарения в среднем по 46,3 м<sup>3</sup>/сек или 46 м<sup>3</sup>/сек с учетом

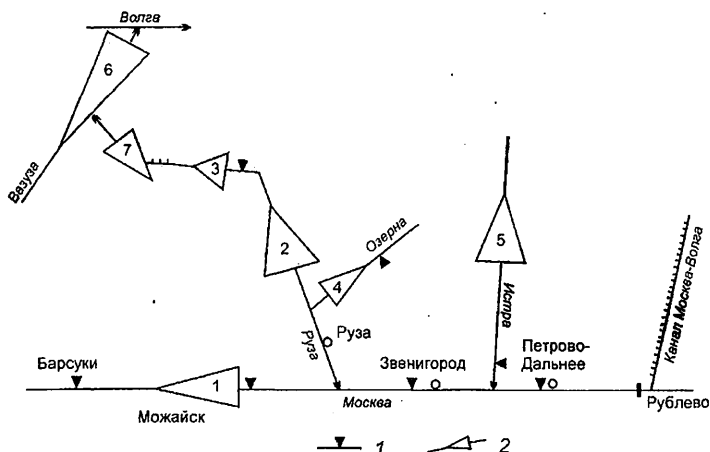


Таблица 11.1

## Основные характеристики водохранилищ Москворецкой системы

| Водохранилища | Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | Полезный объем, млн м <sup>3</sup> | Площадь водной поверхности, км <sup>2</sup> | Среднегодовой сток в районе гидроузлов, м <sup>3</sup> /сек | Год зарегулирования стока |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Можайское     | 1360                               | 221                                | 31,0                                        | 9,29                                                        | 1960                      |
| Рузское       | 1150                               | 216                                | 32,7                                        | 7,54                                                        | 1965                      |
| Озернинское   | 738                                | 140                                | 23,1                                        | 4,8                                                         | 1967                      |
| Истринское    | 1010                               | 179                                | 33,6                                        | 6,24                                                        | 1967                      |
| Вазузское     |                                    | 430                                | 106                                         | 39,2                                                        | 1978                      |
| Яузское       |                                    | 130                                | 51                                          | 3,49                                                        | 1978                      |
| Всего:        |                                    | 1309                               | 277,4                                       |                                                             |                           |

испарения. В том числе за счет Можайского водохранилища можно получать 7,8 м<sup>3</sup>/сек, за счет Рузского – 7,6 м<sup>3</sup>/сек, Озернинского – 4,9 м<sup>3</sup>/сек, Истринского – 6,1 м<sup>3</sup>/сек и за счет Вазузского и Яузского в сумме 19,5 м<sup>3</sup>/сек. Меженный сток р. Москвы в естественных условиях в створе Рублево для года 95%, обеспеченность составлял 8 м<sup>3</sup>/сек, а для года 97% – 7 м<sup>3</sup>/сек. Минимально необходимый санитарный сток р. Москвы ниже створа Рублево, идущий на обводнение реки, оценивается в 5 м<sup>3</sup>/сек. Таким образом, при полной сработке водохранилищ (при современном режиме их использования), в створе Рублево в межень в год 95% обеспеченности можно было бы получать для нужд города около 49 м<sup>3</sup>/сек, что с учетом санитарного стока становится возможным при меженных расходах реки не менее 54 м<sup>3</sup>/сек.

Несмотря на то, что зарегулирование стока было осуществлено в основном в шестидесятых годах и закончено в 1977 г. (см. табл. 11.1) расходы поверхностного стока всего последующего периода вплоть до 1995 г. (т.е. по всему периоду имеющихся наблюдений) продолжали расти. При этом рост меженных и среднегодовых расходов наблюдался по всем рекам водосбора, включая саму р. Москву, начиная с поста Барсуки и далее в створах Можайска, Звенигорода и Петрово-Дальнее, а также и по всем притокам – Лусьянка, Искона, Руза, Озерна, Истра, Медвенка, Заказа (см. рис. 6.14–6.16). Вклад климатических факторов, как было уже выше обосновано, здесь особенно не высок по сравнению с трендами, вызванными техногенными факторами. Этот рост можно объяснить, возможно, как за счет все более полного использования полезного объема водохранилищ, так и все большим использованием в районе подземных вод глубоких горизонтов и сбросом возвратных вод в реки. Поэтому сложившаяся современную природно-техногенную обстановку в районе наиболее

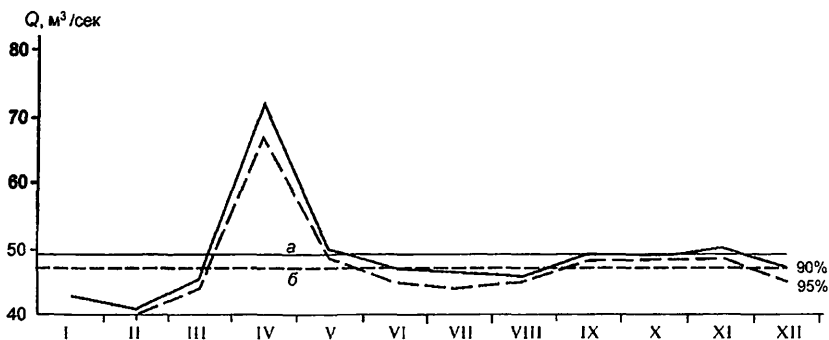
объективно можно оценивать лишь по данным последних лет. В качестве такого репрезентативного периода нами выбран период с 1981 по 1995 гг.

Именно до этого периода были осуществлены все наиболее масштабные зарегулирования стока, включая Вазузское и Яузское водохранилища, что привело к довольно устойчивому меженному стоку в реке в анализируемом замыкающем створе в пределах 45–50 м<sup>3</sup>/сек. В этой связи учет в расчетах более раннего периода наблюдений не имеет смысла, т.к. прежних условий формирования стока уже не будет и впредь. Проведенная мелиорация земель, зарегулирование стока, водоотбор подземных вод и сброс возвратных вод в реки, а также и другие факторы, изменившие сток, прежде всего водохранилища, останутся и поэтому планирование использования водных ресурсов должно осуществляться с учетом сложившихся новых природно-техногенных условий их формирования.

По имеющимся наблюдениям в последнем перед Москвой створе Петрово-Дальнее за последние 15 лет (1981–1995 г.) самые минимальные расходы р. Москвы наблюдались в 1986г. – 42,3 м<sup>3</sup>/сек и в 1987 г. – 39,0 м<sup>3</sup>/сек. Это положение в условиях зарегулированной системы можно объяснить либо отсутствием большей потребности в воде и соответственно не полной сработкой водохранилищ, либо не полным заполнением водохранилищ в период паводка, что более вероятно. В большинстве же последних лет меженный сток колебался от 40 до 53 м<sup>3</sup>/сек. При этом среднегодовые расходы реки изменялись от 54,6 до 85 м<sup>3</sup>/сек, в среднем 61,5 м<sup>3</sup>/сек. Вместе с тем, несмотря на зарегулированность стока, сезонная его неравномерность все еще сохраняется. В отдельные годы расходы реки в паводок достигают 125–218 м<sup>3</sup>/сек, что в 4–5 раз превышает меженные расходы реки. Поэтому возможность дополнительного регулирования стока и в том числе за счет периодического использования подземных вод все еще остается. Как видно зарегулирование стока увеличило меженные расходы более чем в 5 раз, а разница между меженными и среднегодовыми расходами наоборот резко сократилась, что и определяет положительный итог регулирования.

Среднегодовой сток для года 95% обеспеченности из последних 15 лет (1981–1995) составил 47 м<sup>3</sup>/сек, а для года 90% обеспеченности – 49 м<sup>3</sup>/сек. При этом продолжительность многоводных периодов (выше среднегодовых) с учетом весеннего и осеннего периодов в обоих случаях составляет 5 месяцев, маловодных – 7 месяцев (рис.11.4).

По некоторым оценкам сток в бассейне р. Москвы в настоящее время в Рублево на 18% формируется за счет Можайского водохранилища, на 40% за счет Рузского и Озернинского и на 13,8% за счет Истринского



**Рис. 11.4. Внутригодовое распределение стока (пост Петрово-Дальнее) в годы различной водности, выраженной в % обеспеченности**  
Среднегодовые расходы: а - 90%, б - 95% обеспеченности

водохранилища. Суммарный боковой приток малых рек составляет 27%. Таким образом режим стока существенно зарегулирован, т.е. является в значительной мере детерминированным. Вместе с тем природный фактор формирования стока все же проявляется в виде весенних и осенних паводков. Именно эти факторы вносят в режим стока случайный стохастический характер, определяющий как возможности полного заполнения водохранилищ, так и случайно появляющиеся отдельные маловодные периоды. Погашение дефицитов стока в такие периоды может осуществляться за счет форсированной сработки запасов подземных вод.

Принимая во внимание природно-техногенный характер режима поверхностных вод и прежде всего преобладающую роль водохранилищ в формировании меженных расходов реки, можно было бы предположить, что при оптимальной возможности подавать в систему за счет полезного объема водохранилищ до  $46 \text{ м}^3/\text{сек}$  в течение 10-и месяцев, сток в реке в створе Петрово-Дальнее с учетом меженного стока реки в естественных условиях ( $8 \text{ м}^3/\text{сек}$ ) не должен снижаться менее  $54 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Однако данные реальных наблюдений показывают значительные колебания меженного стока в реке от 39 до  $55 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Данное обстоятельство можно объяснить как неэффективным управлением водохранилищами, так и учетом в должной мере природных колебаний стока при планировании подачи воды из водохранилищ пропорционально дефицитам стока по отдельным месяцам года. Все это требует как пересмотра



правил управления данной водохозяйственной системы, так и рассмотрения вопроса о комбинированном использовании поверхностных и подземных вод.

В целях приближенной оценки возможности увеличения среднегодовой бездефицитной отдачи системы в целом можно использовать фактический ряд наблюдений, рассматривая его как сложившийся природно-техногенный режим стока, сознавая при этом, что он может быть изменен разработкой более оптимального диспетчерского графика управления каскадом водохранилищ Москворецкой системы в целом.

Анализ хронологического графика поверхностного стока в створе Петрово-Дальнее, построенного за период с 1981 по 1995 г. по среднемесячным значениям стока, показывает, что для поддержания стабильной водоподдачи в город  $49 \text{ м}^3/\text{сек}$  и соответственно для поддержания межennaleго расхода реки не менее  $54 \text{ м}^3/\text{сек}$  потребовалось бы практически ежегодное включение компенсационного водозабора и довольно часто даже по два-три раза в год. При этом маловодные периоды в эмпирическом ряду наблюдений равные одному месяцу, за 15-летний период наблюдений, встретились 9 раз, двухмесячные и трехмесячные – по 6 раз, четырехмесячные и пятимесячные по 4 раза. Максимальные по объему дефициты стока встретились в 1981 и 1986–1987 гг. соответственно в летнюю и зимнюю межень. В первом случае средний дефицит стока за 5 месяцев составил  $7 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а во втором –  $7,6 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Во всех остальных случаях дефициты стока были существенно ниже.

По наиболее жесткому статистическому графику (рис. 11.5) для поддержания среднегодового стока в  $54 \text{ м}^3/\text{с}$  потребовалось бы включать компенсационный водозабор 5 раз за 100 лет или раз в 20 лет в течение 11 месяцев со средней производительностью  $8,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Для погашения таких максимальных дефицитов в бассейне р. Москвы потребовалось бы создать 4–5 водозаборов аналогичных Звенигородскому. Принципиальное решение данной задачи вполне возможно. Подобный водоотбор в сумме составляет лишь около четверти суммарного питания подземных вод на водосборе и поэтому восполнение сработанных запасов будет гарантировано в сезонном разрезе. Продолжительность маловодных серий также не выходит за пределы допустимых, что обеспечивает, как было показано выше, восстановление напоров до очередного маловодного года, даже если они сгруппируются подряд.

Опыт существующих разведок запасов подземных вод показывает возможность создания компенсационных водозаборов с производительностью до  $1,5\text{--}1,7 \text{ м}^3/\text{сек}$  как в долине р. Москвы, так и в долинах ее притоков – Руза, Истра и Озерна. Благоприятными для этого являются уча-

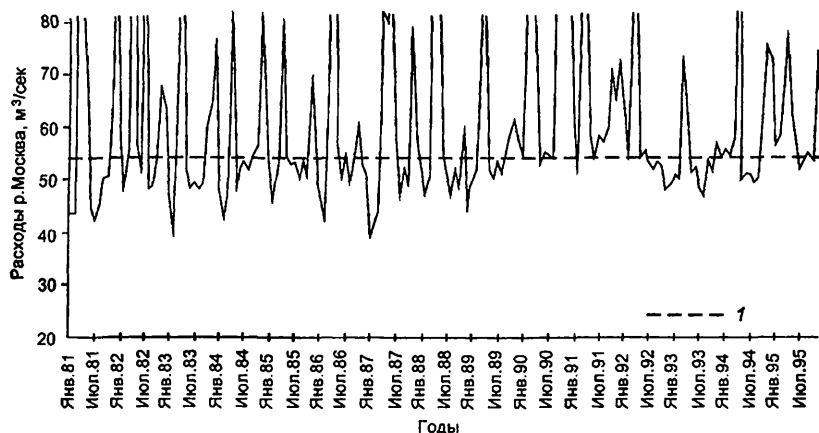


Рис. 11.5. Хронологический график расхода реки Москва створе Петрово-Дальнее  
1 — расчетный среднегодовой расход реки при оптимальном управлении водохранилищами

стки перечисленных выше водохранилищ или участки ниже их по течению. В том числе такие водозаборы могли бы быть заложены в долине р. Москвы на участках выполненных ранее разведочных работ в районе Можайского водохранилища между городом и устьем р. Исконы; в районе Звенигорода на участке между Моженькой и Николиной Горой; в долине Рузы вблизи впадения в нее р. Озерны и в районе Истринского водохранилища.

Таблица 11.2  
Основные гидрогеологические параметры перспективных водоносных горизонтов водосбора р. Москвы (выше Петрово-Дальнее)

| Участок водосбора | Основные водоносные горизонты                                       | Водопроницаемость $km$ , $m^2/сут$ |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Можайский         | Протвинский ( $C_{1pr}$ )<br>Каширский ( $C_{2ks}$ )                | 500–2000                           |
| Рузский           | Подольско-мячковский<br>(Васькинские слои) – $C_{2vs}$              | 400–1200                           |
| Звенигородский    | Подольско-мячковский $C_{2pd-mc}$<br>Каширский, $C_{2ks}$           | 270–2800                           |
| Истринский        | Подольско-мячковский<br>(Васькинские слои) – $C_{2vs}$<br>Каширский | 200–1000                           |

Во всех случаях основными эксплуатируемыми водоносными горизонтами служат здесь напорные воды среднего и нижнего карбона, залегающие на глубинах свыше 50–60 м под моренными, юрскими глинами и отдельными слабопроницаемыми горизонтами карбона, обеспечивающими затрудненность гидравлической взаимосвязи поверхностных и подземных вод и соответственно обеспечивающими отсутствие ощутимых ущербов стоку при водоотборе продолжительностью до 5 месяцев. Основные гидрогеологические параметры рекомендуемых к использованию водоносных горизонтов можно иллюстрировать таблицей 11.2.

Для приближенных оценок среднюю водопроводимость пластов в долине р. Москвы с достаточной осторожностью можно принять равной  $700 \text{ м}^3/\text{сут}$ , а по притокам (Руза и Истра)  $600 \text{ м}^3/\text{сут}$ , а допустимое понижение соответственно 50 и 60 м. Длину водозаборного ряда можно принять равной 15 км. Расчет эксплуатационных запасов подземных вод при периодической сработке напоров за максимально возможный наблюдаемый маловодный период (5 мес.) показал возможность получить в долине р. Москвы по каждому из водозаборов  $1,96 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а в долине притоков –  $1,6 \text{ м}^3/\text{сек}$ , итого в сумме по всем четырем водозаборах можно получить  $7,12 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Таким образом 4 подобных водозабора практически полностью могут покрыть возможные максимальные дефициты стока, оцениваемые, как было показано выше, максимум в 7 и  $7,6 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

При ориентации на предельно жесткий теоретический график внутригодового режима стока, когда каждый из месяцев может оказаться минимальным за многолетие (95% обеспеченность) продолжительность маловодного периода возрастет до 11 месяцев. Расчет сработки запасов подземных вод за такой срок теми же водозаборами может обеспечить на каждом из двух водозаборов в долине р. Москвы лишь по  $1,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а в долинах притоков – по  $1,28 \text{ м}^3/\text{сек}$ , т.е. в сумме лишь  $5,56 \text{ м}^3/\text{сек}$ . В этом

таблица 11.2 (окончание)

| Величина напора,<br>допустимое понижение, м | Пьезопроводность,<br>$\text{м}^2/\text{сут}$ | Удельный дебит,<br>$\text{л}/\text{сек}$ |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| 56–70                                       | $10^6$                                       | 0,5–14                                   |
| 40–70                                       | $2 \cdot 10^6$                               | 0,4–9,3                                  |
| 50–60                                       | $10^6$                                       | 2–26,2                                   |
| 60–100                                      | $2 \cdot 10^6$                               | 0,3–12                                   |

случае потребовалось бы заложить как минимум еще один водозабор в долине р. Москвы, например выше Можайского водохранилища, где как было показано в главе 4 можно получить до  $0,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ . При этом восполнение запасов подземных вод может осуществляться лишь в случае, если маловодные годы не будут группироваться подряд. Предпосылки к этому имеются. Так, отмечаемые тенденции к 2–3-летней цикличности в стоке и уровнях подземных вод, увязываемые с квазидвухлетней ритмичностью в стратосферной циркуляции ветров [26], позволяют предполагать, что после маловодного года с достаточно высокой степенью вероятности должен последовать если не многоводный, то по меньшей мере год более высокой водности, чем предыдущий.

Более того, вероятность того, что в течение года могут встретиться все месяцы с водностью 95% обеспеченности крайне мала, и поэтому также маловероятно появление маловодного периода продолжительностью в 11 месяцев. Поэтому данные оценки представляют собой лишь теоретический интерес, как самый крайний случай. О реальности рассчитанных производительностей компенсационных водозаборов можно судить по выполненным детальной разведке и оценке запасов подземных вод на Звенигородском месторождении, расположенном в 23 км выше города, где была показана возможность отбора  $1,7 \text{ м}^3/\text{сек}$  при непрерывной эксплуатации подземных вод.

Наличие нескольких компенсационных водозаборов в пределах водосборной площади открывает возможность покрытия дефицитов даже довольно значительной продолжительности, естественно не при столь значительных дефицитах стока, как было показано выше. Как уже отмечалось выше, продолжительность периодического водоотбора свыше 6 месяцев в целом нежелательна, т.к. в случае группирования маловодных лет будет отмечаться недовосстановление напоров до начала очередной маловодной серии. Превышение периода периодической эксплуатации данного оптимального срока возможно лишь при наличии достаточно больших запасов подземных вод, значительно превышающих размеры максимального сезонного дефицита стока. В этом случае недовосстановление напоров не будет лимитировать повторный водоотбор на следующий год. При наличии же нескольких невзаимодействующих между собой водозаборов можно включать их последовательно на срок не свыше 6 месяцев каждый. Данное обстоятельство может быть учтено при выработке оптимальных диспетчерских графиков управления каскадом водохранилищ в сочетании с работой водозаборов на подземные воды, когда может оказаться более выгодным создать более продолжительные и менее глубокие перебои стока по сравнению с непродолжительными мало-

водными периодами, но с значительными дефицитами стока в них. Последовательное включение водозаборов на подземные воды в этом случае будет более предпочтительным как с точки зрения гарантированности погашения дефицитов стока при ограниченности запасов подземных вод, так и с позиций большей гарантированности естественного выполнения сработанных запасов подземных вод.

Такое оперативное управление режимом водоотбора может значительно расширить возможности совместного использования поверхностных и подземных вод и значительно повысить коэффициент использования водных ресурсов в целом.

Принимая во внимание то, что р. Москва нуждается в оздоровлении, для разбавления неизбежных загрязнений, связанных с жизнью города, подача воды за счет компенсационных водозаборов может осуществляться естественно в пределах допустимых пределов и в периоды, когда дефициты в хозяйственно-питьевой воде отсутствуют. Можно также предусмотреть включение компенсационных водозаборов ежегодно в межень для повышения эффективности промывок русла. Таким образом, данная система станет основой управления не только количества, но и качества воды.

Следует еще раз подчеркнуть, что выполненные выше оценки повышения водообеспеченности надежности отдачи водосбора р. Москвы были сделаны по сформировавшемуся на сегодня природно-техногенному режиму поверхностного стока в замыкающем створе Москворецкой системы в Петрово-Дальнее, рассматривая его, как пример существующей практики управления данной водохозяйственной системы, которая могла бы сохраниться и в будущем. Однако с учетом появляющегося дополнительного источника возможного управления использованием запасов подземных вод диспетчерский график управления всем каскадом водохранилищ может быть пересмотрен. Критериями оптимизации управления водными ресурсами в этом случае должны стать поиски оптимальных продолжительностей маловодных периодов с возможностью погашения возникающих в них дефицитов за счет существующих запасов подземных вод при одновременном или последовательном включении водозаборов с целью получения максимума отдачи системы в целом. Другими словами, при рассмотрении правил управления водохозяйственной системой в целом можно опираться на каскад не из шести водохранилищ, а на 10–11 водохранилищ, рассматривая месторождения подземных вод как дополнительные малые водохранилища.

В заключение следует отметить, что подземные воды могут стать эффективным и значимым компонентом в межрегиональных водохозяй-

ственных системах, существенно повысить не только надежность их функционирования, но и коэффициент использования водных ресурсов даже в условиях зарегулированного стока существующим каскадом водохранилищ, не создавая дополнительных водохранилищ на реках.

---

---

## **ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Вышеприведенный анализ возможных условий функционирования систем совместного или комбинированного использования поверхностных и подземных вод показал их перспективность в повышении водообеспеченности и отдачи водно-ресурсных систем как в долинах малых незарегулированных рек, так и особенно в долинах зарегулированных рек и водохранилищ питьевого назначения. Периодическое использование подземных вод может оказаться весьма эффективным и для межрайонных водохозяйственных систем.

В долинах зарегулированных и незарегулированных рек наиболее рациональной схемой работы таких систем может служить комбинация из двух водозаборов: основного – инфильтрационного, перехватывающего поверхностный сток в многоводные периоды с сокращением производительности водозабора, вплоть до его отключения, в маловодные периоды (чтобы исключить недопустимые ущербы меженному стоку) и компенсационного водозабора, включаемого только в маловодные периоды для погашения дефицитов поверхностного стока.

В районах водохранилищ питьевого назначения достаточным может быть создание только компенсационных водозаборов, сбрасывающих откачиваемые подземные воды либо прямо в водохранилище, либо подающих воду непосредственно потребителю.

В рамках межрайонных водохозяйственных систем погашение дефицитов поверхностного стока может осуществляться за счет периодического включения водозаборов подземных вод в городах, где запасы подземных вод были ранее сработаны и в которых произошло восстановление напоров после их остановки.

Основные водозаборы инфильтрационного типа закладываются на верхние безнапорные и напорные водоносные горизонты в наиболее благоприятных условиях их гидравлической взаимосвязи с реками. Перспек-

тивными здесь могут оказаться переуглубленные долины палеорек, пересекающие слабо проникающие слои, разделяющие водоносные горизонты. Основной проблемой здесь является изыскание или создание условий для наиболее полного перехвата поверхностного стока в проектных размерах. При недостаточной пропускной способности ложа реки может потребоваться рассмотрение специальных технических решений, обеспечивающих перехват стока, таких как рыхление ложа реки, дноуглубительные работы, искусственное восполнение запасов подземных вод, поиски оптимальных конструкций водозаборных сооружений. При недостаточной эффективности таких мер возможно комбинирование инфильтрационных водозаборов с непосредственным забором воды из рек.

Компенсационные водозаборы наиболее эффективно закладывать на напорные водоносные горизонты, слабо взаимосвязанные с реками. Они могут быть разнесены в пространстве с основным водозабором (вверх или вниз по долине) при возможной их взаимосвязи в период кратковременной периодической работы компенсационного водозабора или совмещены с основным при достаточно надежной изолированности эксплуатируемых горизонтов (верхнего, связанного с рекой, и нижнего несвязанного с ней). Основной проблемой, решаемой при заложении компенсационных водозаборов, является, с одной стороны, обоснование на превышения ущерба стоку 5–7% от меженного расхода рек, т.е. в пределах точности гидрологических измерений, а с другой – обоснование гарантии восстановления сработанных напоров горизонта до очередного маловодного периода. Как показал анализ, компенсационные водозаборы могут включаться в зависимости от выбранного проектного водотока системы в целом, либо практически ежегодно в межень и иногда даже два раза в год, зимой и летом, либо только в отдельные наиболее маловодные годы. При этом чем больше проектный водоток, тем чаще потребуются включение компенсационных водозаборов. Оптимальная продолжительность работы таких водозаборов – 3–5 раз в 6 месяцев в году при возможном их ежегодном включении.

Надежность функционирования систем совместного использования поверхностных и подземных вод зависит от серии требующих изучения факторов. В том числе необходимы:

1. Установление периодичности маловодных серий, их вероятной продолжительности и глубины перебоев или возможных объемов вероятных дефицитов стока. Анализ таких закономерностей может осуществляться как по существующим хронологическим рядам их наблюдений за поверхностным стоком, так и по смоделированным рядам. Для этой цели



может быть использован предложенный динамико-стохастический метод моделирования гидрогеологических рядов. Вполне естественно, чем продолжительней анализируемые ряды наблюдений, тем достоверней может быть результат. В качестве оптимальной и достаточной для практических оценок дискретностью фактических исходных данных могут быть приняты среднемесячные значения стока, т.е. наиболее доступные данные.

2. Оценка запасов подземных вод по наиболее перспективным участкам как применительно для инфильтрационных водозаборов, так отдельно и для компенсационных. Таких участков в зависимости от площади водосбора может быть один или несколько. Вполне очевидно, что чем ближе к устью реки будет выбран участок водоотбора, тем большую часть поверхностного и подземного стока с водосбора можно будет перехватить. Данные о запасах подземных вод по действующим водозаборам, включаемым в межрайонные водохозяйственные системы, могут быть получены на основе изучения опыта их эксплуатации или по данным предшествующих разведок.

3. Обоснование оптимальных конструкций водозаборных сооружений и условий их размещения с учетом взаимосвязи поверхностных и подземных вод. В качестве оптимизационного критерия, как было показано выше, может использоваться эффективная отдача водозабора.

4. Обоснование гарантированности восполнения сработанных в маловодные (дефицитные) периоды запасов до вероятного очередного маловодного периода. В условиях использования наиболее благоприятных для этих целей напорных водоносных горизонтов период сработки запасов не должен превышать 5–6 месяцев, что обеспечит возможность включения компенсационного водозабора ежегодно, т.е. при вероятном группировании маловодных лет подряд. Необходима также оценка гарантированного естественного восполнения (питания) подземных вод.

5. Разработка оптимальных диспетчерских графиков водохранилищ питьевого назначения, позволяющих снизить продолжительность маловодных серий до максимально допустимых с позиций гарантированности восполнения запасов подземных вод, а также снизить объемы дефицитов стока тоже до предельно допустимых с позиций реальных возможностей водоносных горизонтов погасить эти дефициты при форсированной сработке запасов подземных вод в пределах маловодной серии.

6. Обоснование, когда это необходимо, предельно допустимого отбора поверхностного стока с экологических и водохозяйственных позиций, а также экономической эффективности таких систем как альтернативы традиционным способам обеспечения водоснабжения.

При апробации разрабатываемой методологии создания систем совместного использования поверхностных и подземных вод на примере Московского региона потребовалось также изучение закономерностей многолетней изменчивости подземного стока и оценка естественных ресурсов подземных вод на сегодня и в будущем в связи с изменениями климата.

Анализ многолетней изменчивости подземного стока выявил по всему региону существенные положительные тренды с градиентами от 0,02–0,05 до 0,17 л/сек·км<sup>2</sup> в год. Значительная часть проанализированных рядов имеет статистически значимые тренды и явные показатели нестационарности, оцениваемой по изменениям во времени нормы и дисперсии стока, а также в меньшей степени по автокоррелированности членов ряда. Изучение генетических причин таких трендов показало наличие в них как климатических, так и техногенных составляющих. Изменения климата и связанный с этим установленный региональный рост количества атмосферных осадков с градиентами до 3–4 мм/год способны обеспечить рост подземного стока лишь с отмеченными минимальными градиентами (до 0,05 л/сек·км<sup>2</sup> в год). Более значительные тренды обусловлены главным образом возвратными водами, образовавшимися в результате эксплуатации глубоких водоносных горизонтов. Эти воды попадают в грунтовые воды как вследствие утечек из водонесущих коммуникаций, поливов улиц, орошения садовых участков, приводя даже к подтоплению земель, так и сбрасываются непосредственно в реки. Трендовый анализ, а также построение двойных интегральных кривых каждого из анализируемых рядов с рядами с ненарушенным режимом, позволили установить и время начала наиболее существенных техногенных воздействий на поверхностный и подземный сток и их интенсивность. Все это обусловило необходимость учета трендов при оценках возможной производительности водозаборов. Оценка продолжительности маловодных периодов и объемов дефицитов стока в этих случаях осуществлялась по реконструированным рядам, т.е. по рядам с вычлененным трендом и установленной динамической нормой стока.

Изменившаяся климатическая и техногенная обстановка потребовали и переоценки естественных ресурсов подземных вод, как основы для расчетов обеспеченности срабатываемых запасов подземных вод естественным их питанием. Последняя наиболее детальная оценка естественных ресурсов подземных вод региона осуществлялась более 30 лет назад и ее данные в подобных условиях очевидно устарели. Более того выполненные ранее оценки характеризовали лишь среднегодовые модули подземного стока. Для решаемой же задачи, да и вообще для оценок экс

платационных запасов подземных вод, необходимы представления прежде всего о меженном зимнем стоке рек и минимальных среднемесячных значениях стока 95% обеспеченности, характеризующие многолетнюю изменчивость подземного стока или естественных ресурсов подземных вод в наиболее явном виде. Такие оценки были также сделаны. Построена также новая карта располагаемых потенциальных эксплуатационных ресурсов в виде линейных модулей допустимого перехвата поверхностного стока. При этом в качестве допустимого перехвата принято возможное сокращение до 20% минимального среднемесячного стока 95% обеспеченности.

Региональная оценка естественных ресурсов подземных вод осуществлена применительно к выделенным гидрогеологическим районам. Она осуществлялась на основе разработанной методики совместного анализа внутригодового режима поверхностного стока и режима уровней грунтовых вод. Из анализа были исключены ряды или их части по водосборам с сильно нарушенным стоком. Гидрогеологическое районирование выполнено по орографическим признакам, хорошо отражающим разнообразие гидрогеологических условий, т.е. условия питания и разгрузки подземных вод, а также особенности гидрогеологического строения районов.

С учетом проявившихся воздействий изменений климата на водные ресурсы региона осуществлен прогноз возможного изменения среднегодовых модулей подземного стока. Прогноз на 2000 г. (по имеющимся исходным данным до 1995 г.) осуществлен по экстраполяции линейных трендов, а на отдаленную перспективу (при прогнозируемом потеплении климата на 2°C и 3–4°C) – по установленным зависимостям модулей и коэффициентов подземного стока от степени водности года по атмосферным осадкам.

Выполненные оценки и прогнозы показали возможность ориентироваться при обосновании гарантированности восполнения срабатываемых запасов подземных вод на данные о подземном стоке и питании подземных вод, полученные за последние 30 лет, а иногда даже за 10–15 лет, отражающие наиболее реально сложившуюся современную природно-техногенную обстановку формирования подземных вод в регионе.

Выполненные оценки и прогнозы показали также, что меженные естественные расходы рек и тем более располагаемые потенциальные эксплуатационные ресурсы, как часть этих расходов, не в состоянии удовлетворить существующую потребность в воде в регионе без регулирования стока, неизбежного истощения запасов подземных вод и экологически недопустимых ущербов малым рекам. Все это обязывает

обратиться к созданию систем совместного использования поверхностных и подземных вод.

Внедрение систем совместного использования поверхностных и подземных вод в долинах незарегулированных рек позволяет увеличить коэффициент использования водных ресурсов в 3–5 раз и соответственно повысить водообеспеченность водосборов. При этом создаются условия управления этими ресурсами в целях снижения негативных экономических последствий от природной сезонной и многолетней неравномерности стока, осложняющей требуемую стабильность водоснабжения во времени. В долинах зарегулированных рек коэффициент использования водных ресурсов может быть увеличен в 10 и более раз (по сравнению с естественными условиями). Отдача водохранилищ питьевого назначения может быть увеличена на 10–20%, что также очень существенно, т.к. размеры такой отдачи измеряются уже десятками кубометров в секунду. Преимущества долин с зарегулированным стоком и водохранилищ заключается с одной стороны в том, что меженные расходы рек здесь не редко в несколько раз превышают таковые в естественных условиях, что уже создает значительно большие возможности для перехвата поверхностного стока, а с другой стороны – здесь имеется возможность управлять стоком в нужном направлении (снижении продолжительности маловодных серий и глубины перебоев), что повышает эффективность использования водных ресурсов в целом и надежность водоснабжения территорий, в частности. Выполненные расчеты и оценки возможной производительности водозаборов не претендуют на проектные решения и имели целью показать на экспертном уровне реальность создания таких систем, а также возможные масштабы и варианты таких решений.

Помимо несомненных водно-ресурсных преимуществ совместное использование имеет и значительные экологические преимущества. Прежде всего при этом исключается неизбежный ущерб стоку рек, который при производительности водозаборов, соизмеримой с меженным стоком может иметь катастрофический характер для водных экосистем. Также практически исключаются многочисленные нарушения в окружающей среде, сопровождаемые непрерывную эксплуатацию подземных вод (активизация карста, просадка земной поверхности, угнетение наземных экосистем, осушение колодцев, болот, обмеление озер и др.). В таких системах улучшается качество как поверхностных, так и подземных вод, так перехват поверхностного стока инфильтрационными водозаборами позволяет очистить последний от бактериального загрязнения и мутности, а смешение вод более пресных вод инфильтрационных водозаборов с подземными водами компенсационных водозаборов позволяет

снизить минерализацию и жесткость последних, а также снизить в смеси содержание отдельных связанных с гидрохимическими аномалиями компонентов, содержащихся в подземных водах часто в превышающих ПДК концентрациях (железо, марганец, фтор, стронций и др.).

И наконец, совместное использование поверхностных и подземных вод экономически предпочтительно, т.к. позволяет обеспечить малые и средние города исключительно местными водными ресурсами даже в долинах малых рек без регулирования стока и транспортировки воды с удаленных месторождений подземных вод.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что систем совместного использования поверхностных и подземных вод в России пока нет и поэтому отсутствует отечественный опыт их реализации. Выполненные исследования определили пока наиболее общие методические подходы и особенности обоснования надежного функционирования таких систем. Многие из таких вопросов в данной проблеме потребуют еще более детального рассмотрения и разработки. К их числу следует отнести прежде всего создание математических моделей взаимодействия поверхностных и подземных вод в районах таких систем с полным циклом основных процессов (ущербов стоку, сработки и восполнения запасов, взаимодействие горизонтов и др.), разработку методов моделирования внутригодового режима поверхностных вод для надежного обоснования вероятных продолжительностей маловодных серий заданной обеспеченности и объемов дефицита стока в них, разработку методологии обоснования проектной производительности таких систем с учетом изменений климата и техногенных условий на водосборе, разработку критериев допустимых отъемов поверхностного стока, прежде всего в долинах малых рек, разработку методов учета нестационарности режима поверхностного и подземного стока при планировании таких систем и прогноза их поведения в будущем. И, наконец, необходима реализация таких систем на конкретных водосборах с оценкой экономической эффективности систем по сравнению с альтернативным раздельным использованием поверхностных и подземных вод. Внедрение таких рациональных систем использования водных ресурсов в жизнь потребует преодоления еще существующих определенной инерции и узко профессиональных амбиций отдельных лиц, принимающих решения. Необходимость же такого внедрения очевидна.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас гидрогеологических и инженерно-геологических карт СССР. Н.В. Роговская – ред. М.: ГУГК, 1983.
2. Атлас Мирового водного баланса. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
3. Биндеман Н.Н., Язвин Л.С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Госгеолтехиздат, 1970. 214 с.
4. Бочеввер Ф.М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968, 325 с.
5. Боровский Б.В., Самсонов В.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979.
6. Боровский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. Киев: Выща школа, 1989. 407 с.
7. Будыко М.И., Винников К.Я., Дроздов О.А., Ефимова Н.А. Предстоящие изменения климата // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1978. №6. С. 5-20.
8. Будыко М.И. Климат конца XX века // Метеорология и гидрология. 1988. №10. С. 5-20.
9. Великанов А.Л., Клепов В.И., Минкин Е.С. Совместное использование поверхностных и подземных вод в Московской агломерации // Водные ресурсы. 1994. Т.21. №6. С. 711-714.
10. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины // Методы изучения водообмена. Вл. Шестопалов и др. – ред. Киев: Наукова Думка. 1988. 267 с.
11. Гавич И.К. Гидрогеодинамика. М.: Недра, 1988.
12. Гавич И.К. Многолетняя изменчивость питания и режима подземных вод природно-техногенных систем верхнего этажа гидросферы. Обзор // Гидрогеология и инженерная геология. М.: Геоинформмарк, 1995. 42 с.
13. Гидрогеологическое прогнозирование. М.Г.Андерсен и Т.П.Барт – ред. М.: Мир, 1988.

14. Гидродинамические основы изучения режима грунтовых вод и его изменений под влиянием искусственных факторов (Г.Н. Каменский, И.К. Гавич, С.М. Семенова, Н.А. Мясникова) // Тр. ЛГП. М.: АН СССР, 1960. Т.26
15. Гидрогеология СССР. Т.1. Московская область. М.: Недра, 1970. 500 с.
16. Глазунов И.С. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию рациональных схем скважинных водозаборов при разведке подземных вод. М.: Недра, 1973. 125 с.
17. Гриневиц А.Г., Емельянов Ю.Н., Шклянюк О.В. Методика расчета лимитирующего гидрографа на основе многолетних данных о гидрологическом режиме // Вестник Белорус. ГУ. Сер. Химия, биол., геогр. Минск. 1998. №2. С. 68-71.
18. Де Уист Р. Гидрогеология с основами гидрологии суши. М.: Мир, 1969. Т.1. 312 с.
19. Доброумов Б.М., Устюжанин Б.С. Статистический анализ рядов подземного стока в реки в районах интенсивной эксплуатации подземных вод // Тр. ГГИ. Л.: Гидрометеиздат. 1972. Вып. 188. С. 105-114.
20. Каск А.Г., Васильев А.А., Лодэ Э.А. Вопросы охраны окружающей среды Балтийского моря и его региона от загрязнения // Тр. ИПГ. 1998. Вып. 69. С. 99.
21. Клинге Р.К., Воронов А.М., Семенов А.О. Формирование и многолетние изменения водного режима Восточно-Европейской равнины. М.: Наука, 1993. 128 с.
22. Ковалевский В.С. Методическое руководство по изучению режима подземных вод в районах водозаборов. М.: ВСЕГИНГЕО, 1968. 197 с.
23. Ковалевский В.С., Семькина Г.И. Учет продолжительности серий маловодных и многоводных лет в питании подземных вод при планировании рационального их использования // Оценка и рацион. использ. ресурсов подз. вод. М.: Наука, 1980. С. 5-15.
24. Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Недра, 1973. 153 с.
25. Ковалевский В.С. Основы прогнозов естественного режима подземных вод. М.: Стройиздат, 1974. 204 с.
26. Ковалевский В.С. Многолетние колебания уровней подземных вод и подземного стока. М.: Наука, 1976.
27. Ковалевский В.С. Многолетняя изменчивость ресурсов подземных вод. М.: Наука, 1983. 205 с.

28. Ковалевский В.С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией. М.: Недра, 1986. 200 с.
29. Ковалевский В.С. Влияние изменений гидрогеологических условий на окружающую среду. М.: Наука, 1994. 138 с.
30. Ковалевский В.С., Тынкова Л.М. Прогнозная оценка вероятной изменчивости питания подземных вод в будущем при решении задач водоснабжения // Водные ресурсы. 1994. Т.21. №2. С. 189-193.
31. Ковалевский В.С. Гидрогеологическое обоснование совместного использования поверхностных и подземных вод в Московском регионе // Водные ресурсы. 1996. Т.23. №4. С. 472-481.
32. Ковалевский В.С. Динамико-стохастический метод прогноза уровней и расходов подземных вод // Водные ресурсы. 1998. Т.25. №4. С. 399-404.
33. Ковалевский В.С., Раткович Д.Я. Концепция совместного использования поверхностных и подземных вод // Водные ресурсы. 1998. Т.25. №6. С. 738-743.
34. Ковалевский В.С., Семенов С.М., Ковалевский Ю.В. Методы и результаты прогнозных оценок воздействия глобальных изменений климата на экологическое состояние подземных вод и сопряженных природных сред // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: СО РАН, 1998. С. 287-302.
35. Коноплянцев А.А., Семенов С.М. Изучение, прогноз и картирование режима подземных вод. М.: Недра, 1979. 193 с.
36. Коноплянцев А.А., Ярцева-Панова Е.Н. Оседание поверхности земли в связи с понижением уровня подземных вод. М.: ВИЭМС, 1983. 48 с.
37. Концевовский С.Я., Минкин Е.Л. Гидрогеологические расчеты при использовании подземных вод для орошения. М.: Недра, 1989. 253 с.
38. Костяков А.Н., Фаворин Н.Н., Аверьянов С.Ф. Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод. М. 1956.
39. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. М.-Л.: АН СССР, 1950. 377 с.
40. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод М.: МГУ, 1960. 344 с.
41. Кумсиашивили Г.П. Регулирование стока и охрана природных вод. М.: МГУ, 1980. 136 с.
42. Лебедев А.В. Формирование баланса грунтовых вод на территории СССР. М.: Недра, 1980. 287 с.
43. Лебедева Н.А. Естественные ресурсы подземных вод Московского артезианского бассейна. М.: Наука, 1972. 148 с.



44. Минкин Е.Л. Взаимосвязь подземных и поверхностных вод и ее значение при решении некоторых гидрогеологических и водохозяйственных задач. М.: Стройиздат, 1973. 103 с.
45. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Недра, 1983. 357 с.
46. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 241с.
47. Паиковский И.С. Методы определения инфильтрационного питания по расчетам влагопереноса в зоне аэрации. М.: МГУ, 1973. 119 с.
48. Плотников Н.А., Сычев К.И. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с искусственным их восполнением. М.: Недра, 1976. 152 с.
49. Плотников Н.И., Плотников Н.А., Сычев К.И. Гидрогеологические основы искусственного восполнения запасов подземных вод. М.: Недра, 1978. 311 с.
50. Проектирование водозаборов подземных вод (А.И. Арцев, Ф.М. Бочев, Н.Н. Лапшин и др.) М.: Стройиздат, 1976. 292 с.
51. Подземный сток Центральной и Восточной Европы. А.А.Коноплянец – ред. М.: ВСЕГИНГЕО, 1982. 288 с.
52. Предстоящие изменения климата. Совместный советско-американский отчет о климате и его изменениях. М.П.Будыко, Ю.А.Израэль, М.С.Маккрекен, А.Д.Хент – ред. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 272 с.
53. Проблема надежности при многоцелевом использовании водных ресурсов. А.Л.Великанов – ред. М.: Наука, 1994. 225 с.
54. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Проблема гидрологического обоснования проектов атомных электростанций (на примере Калининской АЭС) // Водные ресурсы. Т.24. №3. С. 365-375
55. Раткович Д.Я. К обоснованию совместного использования поверхностных и подземных вод в водохозяйственных системах // Водные ресурсы. 1998. Т.25. №1. С. 92-98.
56. Региональная оценка ресурсов подземных вод. Н.И.Биндеман – ред. М.: Наука, 1975. 136 с.
57. Сванидзе Г.Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 268 с.
58. Сванидзе Г.Г. Тр. ин-та энергетики АН ГССР. 1963. Т.17. С. 273.
59. Семенова-Ерофеева С.М., Клюквин А.Н. и др. Методы прогнозирования влияния водоотбора подземных вод и орошения на геологическую среду. Обзор // ВИЭМС. Сер. Гидрогеол. и инженерн. геол. М. 1980.
60. Субботин А.И., Дрыгало В.С. Экспериментальные гидрологические исследования в бассейне р. Москвы. М.: Гидрометеиздат, 1991. 264 с.

61. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.
62. Усенко В.С. Искусственное восполнение запасов и инфильтрационные водозаборы подземных вод // Наука и техника. 1972. 252 с.
63. Усенко В.С., Черепанский В.С. Оценка сокращения стока малых рек под влиянием эксплуатации водозаборов // Водные ресурсы. 1985. №2.
64. Устюжанин Б.С. Оценка изменений стока рек и восполнение запасов подземных вод в районах интенсивной эксплуатации // Тр. ГГИ. Вып. 188. Л.: Гидрометеиздат, 1972. С. 86-105.
65. Устюжанин Б.С. Оценка изменения стока рек центральной части Московского артезианского бассейна под влиянием крупных водозаборов подземных вод // Сб. ГГИ. 1974. Вып. 213. С. 127-151. Сб. ГГИ. 1972. Вып. 188. С. 86-104.
66. Фащевский Б.В. Нормирование гидрологического режима по экологическим критериям при истощении водных ресурсов // Тр. V Всес. гидрол. съезда. 1990. Т.4. С. 388-404.
67. Фащевский Б.В. Основы экологической гидрологии. М.: Экоинвест, 1998. 239 с.
68. Фролов А.В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний уровня проточных озер. Л.: Наука, 1985. 103 с.
69. Фулян Ю. Совместное использование поверхностных и подземных вод для повышения надежности водоснабжения. Авторферат дисс. М. 1995.
70. Черепанский М.М. Методика оценки влияния отбора подземных вод на речной сток // Инженерно-геологическое обоснование водохозяйственных мероприятий. М.: ВНИИГиМ, 1988. С. 56-62.
71. Чубаров В.Н. Исследования влагопереноса в зоне аэрации при решении гидрогеологических задач. М.: Недра, 1973. 83 с.
72. Чубаров В.Н. Методы исследования зоны аэрации для оценки инфильтрационного питания и условий орошения запасов. М.: Недра, 1972. 135 с.
73. Шестаков В.М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа подземных вод. М.: МГУ, 1965.
74. Шестопалов В.Я. Методы изучения естественных ресурсов подземных вод. М.: Недра, 1988. 169 с.
75. Шестопалов В.М. Водообмен в естественных условиях. Киев: Наукова думка, 1989.
76. Цыганова К.Н. Исследование влияния отбора подземных вод на поверхностный сток // Обзор ВИЭМС «Гидрогеология и инженерная геология». М. 1998. 41 с.

- 
77. Щелкачев В.Н. Упругий режим пластовых водонапорных систем. М.: Гостоптехиздат, 1959. 430 с.
  78. Язвин Л.С. К вопросу оценки допустимого влияния отбора подземных вод на поверхностный сток // Тр. IV Межд. конгр. ЭКВАТЭК-2000. Водные ресурсы. Подземные воды. М. 2000. С. 288.
  79. Яцык А.В. Экологические основы рационального водопользования. Киев: Генеза, 1997. 640 с.
  80. Birtles A.B. Siting of groundwater abstractions for river regulation // Memoirs IAH. Symp. Birminham. 1977. Vol. XIII P.I. P. 82-41.
  81. Custodio E., Cacho F, Suares M, Javier F. Mirales J. Combine use of surface and ground water in the Barcelona Metropolitan area (Spain) // Memoirs IAH. Symp. 1977. Vol. XIII. P.I. P. 14-27.
  82. Downing R.A. Groundwater resources, their development and management in the UK an historical perspective // Quarterly J. Engineer. Geol. 1993. №26. P. 335-358.
  83. Kemp J.B. Wright C.E. The assesment of river regulation losses // Memoirs IAH. Symp. 1997. Vol. III P.I. P. 1-19.
  84. Memoires of IAH. Birmingham congr. 1977. Vol. XIII, P.I.
  85. Velikanov A., Klepov V., Minkin E. Combine of Surface and ground water use in the Moscov agglomeration as a mean of reduging negative environmental impact. Wash. D.C. 1993.

Научное издание

*Ковалевский  
Владимир Серафимович*

**Комбинированное использование ресурсов  
поверхностных и подземных вод**

«Научный мир»

119890, Москва, Знаменка, 11/11

Тел./факс (007) (095) 291-2847

E-mail: [naumir@ben.irex.ru](mailto:naumir@ben.irex.ru). Internet: [http://195.178.196.201/N\\_M/n\\_m.htm](http://195.178.196.201/N_M/n_m.htm)

Лицензия ИД № 03221 от 10.11.2000

Гигиеническое заключение

№ 77.99.6.953.П.3619.6.99 от 29.06.99.

Подписано к печати 27.04.2001

Формат 60×90/16

Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 21

Тираж 500 экз. Заказ 101

Издание отпечатано в типографии

ООО «Галлея-Принт»

Москва, 5-я Кабельная, 26