

## Управление питанием подземных вод: решение проблемы дефицита водных ресурсов в Ферганской долине ●●●

Авторы: Акмал Каримов, Владимир Смахтин, Аслон Мавлонов, Вячеслав Борисов, Инна Грачева, Фазледдин Мирюсупов, Жамол Джуманов, Татьяна Хамзина, Рустам Ибрагимов и Ботир Абдурахманов



### **Исследовательские отчеты**

Публикации данной серии охватывают широкий спектр различной тематики – от компьютерного моделирования до накопленного практического опыта работы с ассоциациями водопользователей, а по содержанию включают как научную деятельность, имеющую непосредственное практическое применение, так и фундаментальные исследования, на которых основываются практические работы. Некоторые научные отчеты являются результатом узко специализированных, аналитических и детальных эмпирических исследований, а другие представляют обширные и комплексные обзоры общих проблем.

Несмотря на то, что большинство отчетов публикуется сотрудниками Международного Института Управления Водными Ресурсами (ИВМИ) и в сотрудничестве с организациями-партнерами, вклад других организаций так же поощряется. Каждый отчет проходит внутреннюю, сотрудниками ИВМИ, и внешнюю рецензию. Отчеты публикуются и распространяются как в виде печатных копий, так и в электронном виде ([www.iwmi.org](http://www.iwmi.org)) и по мере возможности, все данные и анализы выставляются на сайте в виде отдельных файлов, доступных для скачивания. Отчеты могут быть использованы с соответствующими ссылками на них.

### **О Международном Институте Управления Водными Ресурсами (ИВМИ)**

*Миссия ИВМИ заключается в совершенствовании управления земельными и водными ресурсами для обеспечения продовольствия, благосостояния и защиты окружающей среды. При осуществлении этой миссии ИВМИ делает упор на интеграцию стратегий, технологий и систем управления для достижения практических решений злободневных проблем – получения практических, обоснованных результатов в области орошения и управления земельно-водными ресурсами.*

*Исследовательский отчет Международного Института  
Управления Водными Ресурсами № 151*

**Управление питанием подземных вод:  
решение проблемы дефицита водных  
ресурсов в Ферганской долине**

*Авторы: Акмал Каримов, Владимир Смахтин, Аслон  
Мавлонов, Вячеслав Борисов, Инна Грачева, Фазледдин  
Мирюсупов, Жамол Джуманов, Татьяна Хамзина, Рустам  
Ибрагимов и Ботир Абдурахманов*

**Международный Институт Управления Водными Ресурсами (ИВМИ)**  
Почтовый ящик 2075, г. Коломбо, Шри Ланка

*Авторский коллектив:* Акмал Каримов – научный сотрудник - гидрогеолог Центрально-Азиатского офиса Международного Института Управления Водными Ресурсами (ИВМИ), г. Ташкент, Узбекистан, Владимир Смахтин – лидер темы «Наличие и доступность водных ресурсов», штаб-квартира института, г. Коломбо, Шри-Ланка, Аслон Мавлонов – заместитель председателя Государственного Комитета Геологии и Минеральных Ресурсов Республики Узбекистан, г. Ташкент, Вячеслав Борисов – старший гидрогеолог ГП ГИДРОИНГЕО, г. Ташкент, Инна Грачева – специалист по моделированию режима подземных вод, ГП «Институт ГИДРОИНГЕО», г. Ташкент, Фазлелдин Мирюсупов – главный гидрогеолог, ГП «Институт ГИДРОИНГЕО», г. Ташкент, Жамол Джуманов – специалист по моделированию режима подземных вод, ГП «Институт ГИДРОИНГЕО», г. Ташкент, Татьяна Хамзина – почвовед, Институт «Узгипромелиоводхоз», г. Ташкент, Рустам Ибрагимов – ГИС-специалист, Институт «Узгипромелиоводхоз», г. Ташкент и Ботир Абдурахманов – аспирант, Ташкентский институт ирригации и мелиорации, г. Ташкент.

Каримов А., Смахтин В., Мавлонов А., Борисов В., Грачева И., Мирюсупов Ф., Джуманов Ж., Хамзина Т., Ибрагимов Р., Абдурахманов Б. Управление питанием подземных вод: решение проблемы дефицита водных ресурсов в Ферганской долине. Исследовательский отчет Международного Института Управления Водными Ресурсами (ИВМИ) № 151. 49 стр. 2013 г. Отчет доступен на сайте [www.iwmi.org](http://www.iwmi.org). d.o.i: 10.5337/2013.211.

*Ключевые слова:* управление водными ресурсами/ месторождения подземных вод/ питание подземных вод/ нехватка воды/ равнины/ бассейны рек/ расход воды, верхнее/нижнее течение реки, орошение грунтовыми водами/ каналы/ увеличение использования подземных вод/отбор подземных вод/магазинирование водных ресурсов/скважины/водохранилища/ искусственное восполнение/инфильтрация/ орошаемые земли/ почвенный профиль/ модели/ Центральная Азия/ Ферганская долина/

ISSN: 1026-0862

ISBN: 978-92-9090-774-9

Отчет был переведен на русский язык с оригинала:

Karimov, A.; Smakhtin, V.; Mavlonov, A.; Borisov, V.; Gracheva, I.; Miryusupov, F.; Djumanov, J.; Khamzina, T.; Ibragimov, R.; Abdurahmanov, B. 2013. Managed aquifer recharge: the solution for water shortages in the Fergana Valley. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). 51p. (IWMI Research Report 151). doi:10.5337/2013.205

Авторские права принадлежат ИВМИ, 2013, защищены. ИВМИ поощряет использование своих материалов при условии ссылок на институт и информировании обо всех случаях ссылок.

*Фото на обложке:* Турдали Нассрединов, консультант ИВМИ и Абдусалом Каюмов, начальник Управления Ирригационных Систем, Бешарыкский район Ферганской области Узбекистана, обсуждают возможность увеличения питания подземных вод. Дата фотографии: май, 2009 г. Автор фотографии: Акмал Каримов, ИВМИ.

Просьба посылать все запросы и комментарии по адресу: [IWMI-Publications@cgiar.org](mailto:IWMI-Publications@cgiar.org)

Бесплатная копия данной публикации может быть скачена с сайта  
[www.iwmi.org/Publications/IWMI\\_Research\\_Reports/index.aspx](http://www.iwmi.org/Publications/IWMI_Research_Reports/index.aspx)

## Благодарность

Авторы выражают признательность сотрудникам Управления Ирригационных Систем Бешарыкского района Ферганской области Узбекистана за их сотрудничество и участие в полевых работах. Особая благодарность выражается Тохиру Аулчаеву, ведущему гидрогеологу экспедиции ГП «Институт ГИДРОИНГЕО» в Ферганской области, Турдали Нассретдинову, консультанту ИВМИ и Абдусалому Каюмову, начальнику Управления Ирригационных Систем Бешарыкского района Ферганской области за их ценный вклад в проведение полевых работ. Авторы также выражают благодарность доктору Полу Павелику, старшему научному сотруднику - гидрогеологу офиса ИВМИ по Юго-Восточной Азии, Вьентьян, Лаос, доктору Пратапару Санмугану, лидеру темы “Продуктивное использование воды”, ИВМИ, офис Нью-Дели, Индия и анонимному рецензенту за их ценные комментарии и предложения, способствовавшие улучшению заключительной версии этого исследовательского отчета.

## Сотрудничество организаций-партнеров

Это научное исследование проводилось в сотрудничестве следующими организациями:



Международный Институт Управления Водными Ресурсами (ИВМИ)



ГП “Институт Гидрогеологии и Инженерной Геологии” (ГИДРОИНГЕО)



Фонд Международного Развития ОПЕК

## Доноры

Выражаем благодарность за непрерывную финансовую поддержку, оказанную данной исследовательской работе со стороны Фонда Международного Развития Организации стран – экспортеров нефти и, позднее, Программой Исследований консультативной группы по международным сельскохозяйственным исследованиям (КГМСИ) по водным и земельным ресурсам и экосистемам.



Фонд Международного Развития ОПЕК



Эта исследовательская работа проведена как часть Программы исследований КГМСИ по водным и земельным ресурсам и экосистемам. Международный институт управления водными ресурсами является членом Консорциума КГМСИ и руководит данной программой.



## Содержание

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Резюме                                                                         | vii |
| Введение                                                                       | 1   |
| Управление питанием подземных вод: концепция и примеры                         | 3   |
| Управление питанием подземных вод в Ферганской долине                          | 7   |
| Предлагаемая стратегия управления питанием подземных вод для Ферганской долины | 8   |
| Оценка потенциала управления питанием подземных вод в Ферганской долине        | 10  |
| Управление питанием подземных вод на пилотных участках: бассейн реки Исфары    | 14  |
| Управление питанием подземных вод на пилотных участках: бассейн реки Сох       | 26  |
| Заключение                                                                     | 40  |
| Использованная литература                                                      | 41  |



## Резюме

Растущая потребность в продовольствии и энергии привела к усилению конкуренции за воду между водопользователями верхнего и нижнего течения бассейна р. Сырдарьи. Перевод режима эксплуатации водохранилища в верхнем течении реки с ирригационно-энергетического на энергетический вызвал сокращение речного стока в нижнем течении в летний период и увеличение в зимний. Это привело к дефициту доступной воды в нижнем течении в объеме 2 – 3 млрд. м<sup>3</sup> в год в летнее время и в то же время к избыточному, часто неиспользуемому, стоку того же объема в зимнее. Исследования, приведенные в данном отчете, показывают, что при современной практике регулирования стока рек последовательно расположенными русловыми водохранилищами потребность в воде водопользователей либо верхнего, либо нижнего течения остаются неудовлетворенными. Поэтому рассматривается альтернативный подход – управление питанием подземных вод (УППВ) в Ферганской долине с целью адаптации к новым реалиям управления водными ресурсами. Благоприятные гидрогеологические условия, преобладающие в Ферганской долине, позволяют УППВ с целью решения проблемы нехватки водных ресурсов на местном и региональном уровнях. В данной научной работе представлена пошаговая процедура

применения УППВ в Ферганской долине, включающая как региональную оценку потенциала УППВ, так и тестирование на пилотном уровне путем моделирования и полевых испытаний. Региональная оценка показывает, что более 500 тыс. га (55 %) орошаемых в настоящее время земель в Ферганской долине могут быть переведены с орошения из каналов на совместное использование вод как из поверхностных источников, так и подземных горизонтов. Это позволит сократить объем возвратных вод в реку на 30 % (или на 1 млрд. м<sup>3</sup>/год) и сформировать свободные емкости объемом 500 млн. м<sup>3</sup> в зоне командования магистральных каналов. Исследования водоносных горизонтов в бассейне рек Исфары и Сох Ферганской долины на пилотных объектах подтверждают результаты региональной оценки. В целом ожидается, что увеличение использования подземных вод на орошение и применение УППВ в Ферганской долине должно привести к сокращению зимнего стока р. Сырдарьи на границе долины на 1,5 млрд. м<sup>3</sup>/год и, следовательно, к увеличению летнего стока на ту же величину. В данном отчете предлагается направить фокус проектов развития в Ферганской долине от реабилитации густой сети дренажа на расширение использования подземных вод на орошение и УППВ.



# **Управление питанием подземных вод: решение для преодоления дефицита воды в Ферганской долине**

*Акмал Каримов, Владимир Смахтин, Аслон Мавлонов, Вячеслав Борисов, Инна Грачева, Фазледдин Мирюсупов, Жамол Джуманов, Татьяна Хамзина, Рустам Ибрагимов и Ботир Абдурахманов*

## **Введение**

Бассейн р. Сырдарьи вместе с ее главным притоком р. Нарын охватывает водосборную территорию площадью 219 тыс. км<sup>2</sup>, где образуется около одной трети общего водного стока, ранее поступавшего в Аральское море. Орошаемым сельским хозяйством в бассейне занимались с древних времен. Однако крупномасштабное регулирование водных ресурсов во второй половине двадцатого столетия и более поздние геополитические изменения, связанные с возникновением в 90-х годах независимых государств, значительно изменили гидрологию реки и привели к усложнению общего управления водными ресурсами в нижнем течении бассейна.

В настоящее время наблюдается значительный дефицит водных ресурсов для нужд сельского хозяйства и окружающей среды в среднем и нижнем частях бассейна р. Сырдарьи. Этот дефицит возникает, прежде всего, по следующим трем причинам:

- **Неравномерное распределение ограниченного объема воды.** В средней и нижней частях бассейна образуется всего 10,9 км<sup>3</sup> воды (29 % от среднемноголетнего стока реки), в то время как потребность в воде сельского хозяйства и окружающей среды в низовьях реки, по крайней мере, в два раза больше (Abdullaev и др., 2007). Как следствие, увеличение потребности в воде делает водопользователей среднего и нижнего течения еще

более зависимыми от объема стока, поступающего с верхнего течения.

- **Растущая конкуренция за воду.** Растущая конкуренция за воду между выработкой электроэнергии на гидроэлектростанциях, расположенных в верхнем течении, и сельским хозяйством и окружающей средой в низовьях реки, так же приводит к нехватке воды. Перевод режима функционирования водохранилища, расположенного в верхнем течении р. Нарын, от ирригационного к энергетическому в начале 1993 г. и связанное с этим увеличение зимних пусков и сокращение летнего стока вызвало ежегодную нехватку 3 км<sup>3</sup> воды для нужд сельского хозяйства в среднем и нижнем течении (Мустафаев и др., 2006). Совпадение пиков максимальных объемов зимних энергетических пусков и возвратных вод с орошаемых территорий Ферганской долины приводит к образованию излишнего стока реки в зимний период, что усложняет эксплуатацию водохранилищ, расположенных ниже по течению. Водоохранилища, расположенные в среднем и нижнем течении, не имеют достаточных свободных емкостей для накопления чрезмерного зимнего стока с верхнего течения для дальнейшего использования этой воды в летний период.
- **Глобальное изменение климата и его воздействие на водные ресурсы.** За последние 70 лет температура воздуха

ежегодно увеличивалась на  $0,029^{\circ}\text{C}$ , сопровождаясь большими колебаниями выпадения осадков. Согласно данным Гидрометеорологической службы Узбекистана, сокращение стока р. Сырдарьи к 2050 г. может составить примерно 6-10 % и сопровождаться более частой периодичностью возникновения экстремально высоких и низких объемов стока, что вызовет потребность в увеличении регулировочных емкостей (Агальцева, Пак, 2007).

Как показал опыт, каскад водохранилищ, расположенных вдоль русла р. Сырдарьи, не обладает достаточной емкостью для одновременного удовлетворения потребностей в воде водопользователей как в верхнем, так и нижнем течении. Чрезмерный объем речного стока в зимний период и недостаток свободных емкостей водохранилищ приводят к вынужденным сбросам излишней пресной воды в засоленные понижения в среднем течении реки, что в свою очередь создает нехватку водных ресурсов на орошение в летний период и является основным следствием несогласованного управления водными ресурсами на уровне бассейна.

Таким образом, существует необходимость в поиске альтернативных, дополнительных емкостей для хранения временно формируемых 'излишков' водных ресурсов. Одной из таких потенциальных возможностей является использование подземных емкостей. Гидрогеологические условия Ферганской долины в верхнем течении р. Сырдарьи являются благоприятными для хранения излишнего зимнего стока для использования этой воды в летний период. В Ферганской долине формируются два главных и множество мелких притоков, подпитывающих р. Сырдарью. Объем подземной емкости, которая на данном этапе почти заполнена водой, оценивается в  $200 \text{ км}^3$  (Мавлонов и др., 2006). Возобновляемые ресурсы подземных вод должны быть использованы с пользой, что приведет к высвобождению части емкостей для хранения зимнего стока путем управления питанием подземных вод (УППВ) (Dillon, 2005; 2011).

Первые попытки внедрения принципов УППВ в Узбекистане предпринимались для целей коммунально-бытового водоснабжения (Мирзаев, 1972; Акрамов, 1991). Сооружения для искусственного восполнения запасов подземных вод (открытые каналы) были созданы в 70-х годах для заполнения подземных емкостей водой р. Чирчик для снабжения г. Ташкента питьевой водой. Подобные сооружения так же использовались для водоснабжения поселков Республики Каракалпакстан и Хорезмской области в нижнем течении р. Амударьи. В Каракалпакстане в зоне командования магистральных каналов с преобладанием песчаных грунтов на нескольких участках были построены сооружения с целью увеличения питания подземных вод в период июль – август (сезон наибольшей водоподдачи), когда минерализация воды в каналах низкая. Инфильтрация воды из магистральных каналов приводит к возникновению временных пресноводных линз поверх минерализованных вод. Эту пресную воду затем откачивают для снабжения питьевой водой сельского населения в течение всего года. Исследования с применением моделирования, выполненные специалистами ГП «Институт ГИДРОИНГЕО», позволили определить оптимальный режим отбора подземных вод, позволяющий предотвратить смешивание пресных и минерализованных вод, таким образом поддерживая качество откачиваемой из пресноводных линз воды на приемлемом для питьевого водоснабжения уровне вплоть до следующего сезона (Грачева, специалист по моделированию подземных вод, ГП «Институт ГИДРОИНГЕО», 18.12.2009).

Возможность УППВ для нужд сельского хозяйства в Узбекистане была исследована в 1970-1990 гг. С. Ш. Мирзаевым (1972), А. А. Акрамовым (1991) и Л. З. Шерфетдиновым (2000). В результате выделены месторождения, обладающие высоким потенциалом для их искусственного восполнения. К ним отнесены Китаб-Шахрисабзское в бассейне р. Кашкадарьи, Исковат-Пишкаранское, Ош-Араванское, Исфаринское и Сохское

в Ферганской долине (Акрамов, 1991). Свободные емкости Ош-Араванского месторождения оценены в 500 млн. м<sup>3</sup>, а Сохского – в 200 млн. м<sup>3</sup> (Акрамов, 1991). Полевые исследования, проведенные в пределах Китаб-Шахрисабзского месторождения показали, что отбор подземных вод может привести к увеличению свободной емкости до 950 млн. м<sup>3</sup>. Кроме того, результаты моделирования показали, что отбор подземных вод с расходом 5,5 м<sup>3</sup>/с позволит увеличить свободную емкость водоносных горизонтов Исковат-Пишкаранского месторождения до 500, 800 и 1043 млн. м<sup>3</sup> после 10-ти, 20-ти и 30-ти лет откачки, соответственно. Главным ограничивающим фактором УППВ является наличие свободного стока рек, а не наличие свободных емкостей водоносных отложений. Искусственное восполнение подземных вод в сельскохозяйственных целях в Центральной Азии в прошлом ограничивалось лишь теоретическими исследованиями и моделированием.

Основное различие в использовании воды в сельском хозяйстве в бассейне р. Сырдарьи по сравнению с другими Азиатскими странами заключается в том, что сельское хозяйство, которое полностью зависит от орошения из системы каналов и подачи воды по бороздам, формирует основную долю питания подземных вод. Несколько проектов орошения земель на базе совместного использования подземных и поверхностных вод были реализованы в предгорьях Ферганской долины (Тихонова, 1972; Мирзаев, 1972). Положительный эффект совместного использования подземных и поверхностных вод по предупреждению засоления и заболачивания почв был продемонстрирован на Казалинской, Аштской и Дальверзинской оросительных системах. Отбор подземных вод достиг максимального уровня к середине 90-х годов, но затем уменьшился из-за снижения инвестиций в водное хозяйство в странах региона в переходный период.

Растущая нехватка поверхностных вод в бассейне р. Сырдарьи требует поиска

альтернативных источников, включая подземные воды. Заранее спланированное УППВ может предотвратить возможные негативные последствия, которые могут возникнуть при переходе от использования воды в сельском хозяйстве из системы каналов к совместному использованию подземных и поверхностных вод. Использование подземных вод для нужд сельского хозяйства в Центральной Азии все еще имеет значительно меньшие масштабы по сравнению с использованием оросительной воды из каналов, а реализация УППВ на данном этапе очень ограничена. Внедрение УППВ в широком масштабе может значительно уменьшить последствия нарастающего дефицита водных ресурсов и улучшить управление водными ресурсами как на местном, так и региональном уровнях. В данном отчете приведен обзор опыта УППВ в аридных регионах Индии, Китая, Австралии и США и предлагаются пути адаптации УППВ в Ферганской долине. Цель этой работы – привлечь внимание лиц, принимающих решения, и специалистов-практиков к выгодам внедрения УППВ в регионе. Далее описана предлагаемая процедура внедрения УППВ для условий Ферганской долины.

#### **Управление питанием подземных вод: концепция и примеры**

УППВ предназначено для регулирования питания подземных вод с целью увеличения объема водных ресурсов, улучшения качества воды в подземных горизонтах и регулирования возвратных вод с орошаемых территорий. Внедрение практики УППВ может иметь следующие выгоды:

- Временное magazинирование водных ресурсов в подземных горизонтах для использования в будущем.
- Поддержание оптимальных уровней грунтовых вод и предотвращение их истощения, подъема, уменьшение засоления и заболачивания почв.

- Сокращение непродуктивных потерь воды: на испарение; отток в водоприемники соленых вод без возможности их извлечения, где они расходуются бесполезно; и загрязнение.
- Борьба с наводнениями.
- Улучшение качества поверхностных и подземных вод.
- Экологические выгоды (расходование подземных вод на орошение ландшафтов или подземный приток к рекам).

Различные методы УППВ наряду с подготовительной деятельностью могут быть применены в сельском хозяйстве, включая:

- Регулирование естественного питания подземных вод.
- Применение способов искусственного восполнения подземных вод для увеличения или пополнения их запасов.
- Внедрение водосберегающих технологий для уменьшения площадного или линейного питания подземных вод, способствующего перетоку солевых растворов из зоны аэрации в грунтовые воды.
- Отбор подземных вод с целью усиления фильтрации из русел рек, пойм, дна каналов и дрен.
- Отбор подземных вод для создания свободных емкостей в подземных горизонтах.
- Изменение структуры сельхозкультур и методов обработки почв с целью регулирования питания подземных вод.

За последние десятилетия отмечалось значительное увеличение отбора подземных вод во всем Миров. Неустойчивое использование подземных вод сопровождалось снижением их уровня на больших территориях и ухудшением их качества (Shah и др., 2000). Повышенные темпы истощения запасов подземных вод наблюдались во многих странах

(Индия, Китай, США и Мексика) как следствие увеличения численности населения и мер, направленных на получение экономической прибыли (Rosegrant и др., 2002). В некоторых регионах истощение запасов подземных вод привело к тому, что дальнейший отбор подземных вод оказался экономически невыгодным, что побудило фермеров и власти к поиску альтернативных путей.

## Индия

Экономика Индии основана на сельском хозяйстве, а недостаточность емкостей водохранилищ в объеме 174 км<sup>3</sup> послужила толчком к увеличению использования ресурсов подземных вод. Необходимость увеличения емкостей водохранилищ связана с растущей потребностью в воде различных отраслей экономики Индии, в особенности сельского хозяйства. Бесконтрольное использование подземных вод путем строительства 19 млн. колодцев и мелких скважин, а впоследствии и глубоких скважин позволило увеличить орошаемые площади с 6,5 млн. га в 1950 г. до 58,5 млн. га в 2009 г. (Sakthivadivel, 2007; Sharma, 2009). В то время, как площади, орошаемые из поверхностных источников, возросли на 28 %, площади, орошаемые подземными водами, увеличились за тот же период на 105 %. Увеличение использования подземных вод привело к удовлетворению основных потребностей в оросительной и питьевой воде сельского населения численностью в 700 млн. чел. и более чем 50 % городских и промышленных секторов. Однако неконтролируемая эксплуатация запасов подземных вод в засушливых и полусушливых регионах привела к непрерывному снижению уровня воды на площади примерно 340 тыс. км<sup>2</sup>. В период с 1992 по 2005 г. число «опасных блоков» (единица территории) увеличилось с 325 до 1615, включая 839 чрезмерно эксплуатируемых (Kumar, Rajput, 2005). Наибольшее истощение запасов подземных вод отмечено на западе Индии, а общее число чрезмерно

эксплуатируемых блоков продолжает расти при нынешнем темпе в 5,5 % в год. Ожидается, что к 2018 г., приблизительно 36 % территории Индии будет испытывать серьезный дефицит водных ресурсов из-за истощения подземных вод (Kumar, Rajput, 2005).

В то время, как снижение уровня грунтовых вод вызвало серьезные экологические, социальные и экономические проблемы, в стране существует потенциал для увеличения питания подземных вод. Ежегодный объем осадков составляет 4 тыс. км<sup>3</sup>, из которых примерно 1,24 тыс. км<sup>3</sup> образует поверхностный сток. Анализ показал, что из этого объема 872 км<sup>3</sup> воды доступно для пополнения запасов подземных вод, и возможно иметь запасы подземных вод в объеме 214 км<sup>3</sup> (Tuinhof и др., 2002). С целью использования этого потенциала основной упор в Индии делается на разработку и реализацию мероприятий по питанию подземных вод, для чего широко развивается использование водосборных территорий по всей стране. Стоимость эксплуатации микроводосборных территорий, включающая строительство перегораживающих плотин и инфильтрационных водоемов, в настоящее время оценивается более чем в 500 млн. долл. США в год (Central Ground Water Board, 2005). Результаты всесторонней оценки, недавно опубликованные в Генеральном Плане по Искусственному Питанию Подземных Вод в Индии (Central Ground Water Board, 2005), показали, что принципы УППВ могут быть распространены на площади 448,76 тыс. км<sup>2</sup> или на 14 % от общей территории страны с ежегодным объемом воды 36,453 млрд. м<sup>3</sup>, доступной для питания подземных вод. Оценочные расчеты показали, что средний объем дополнительного питания подземных вод по всей водосборной площади в масштабе страны составит 80 мм.

Подпитывание подземных вод на водосборной площади будет достигнуто при помощи сбора воды с поверхности 3,7 млн. крыш в городах и 0,225 млн. крыш в сельских районах, 37 тыс. инфильтрационных водоемов объемом 0,2 млн. м<sup>3</sup> каждый, 110 тыс.

перегораживающих плотин (объемом 0,03 млн. м<sup>3</sup> каждая), 48 тыс. шахт и колодцев (объемом 0,03 млн. м<sup>3</sup> каждый), 26 тыс. закрытых оврагов и габионов (объемом 0,005 млн. м<sup>3</sup> каждый) и, помимо прочего, использования в дальнейшем 2,7 тыс. родников на холмистых территориях (Central Ground Water Board, 2005; Romani 2005).

## Китай

Запасы подземных вод в различных областях Китая распределены и используются неравномерно. Согласно данным Министерства земельных ресурсов Китая, объем ежегодного естественного питания пресных подземных вод в стране составляет 884 км<sup>3</sup> или примерно одну треть всего объема (Ministry of Land Resources of China, 2005). Около 70 % ресурсов подземных вод распространены на юге Китая и около 30 % на севере страны. Однако интенсивность использования подземных вод в этих регионах значительно различается: сельские и городские водопользователи севера используют больше 70 % разведанных ресурсов, тогда как на юге – менее 30 % (Jinxia и др., 2007). Согласно данным Министерства водных ресурсов Китая и Наньцзиньского института водных ресурсов, в начале 2000-х годов использование подземных вод в стране превышало 100 км<sup>3</sup>, или 20 % от общего водопользования (Ministry of Water Resources of China and Nanjing Water Institute, 2004). Однако это использование по территории Китая производится неравномерно, с отбором всего 14 % ресурсов на юге и 49 % на севере, где подземные воды были и остаются важным источником водоснабжения сельского хозяйства в частности, и экономики региона в целом. Интенсивное использование подземных вод так же привело к возникновению ряда экологических проблем, в частности связанных с чрезмерной откачкой этих вод на севере Китая (Ministry of Land Resources of China and Nanjing Water Institute, 2004). Проблема является широко распространенной – снижение

уровня грунтовых вод отмечено на 48 % сельской местности шести провинций (Wang и др., 2005). Со снижением уровня грунтовых вод затраты на откачку подземных вод повысились на 0,005 юаней за м<sup>3</sup>, и поэтому колодцы для отбора подземных вод на нужды сельского хозяйства во многих случаях были заброшены или заменены новыми, более глубокими (Ministry of Land Resources of China and Nanjing Water Institute, 2004).

Для решения этих проблем были рассмотрены два подхода: меры по экономии водных ресурсов, используемых в сельском хозяйстве, и УППВ. Снижение потребности в воде путем принятия мер по водосбережению направлено, прежде всего, на достижение реальной экономии воды объемом 50 мм/год, что приведет к снижению объемов отбора подземных вод на орошение. Мерами, способствовавшими сокращению темпов снижения уровня грунтовых вод, являются: подача поливной воды по трубам низкого давления вместо открытых каналов в земляном русле; применение технологии капельного орошения и орошения микродождеванием; усовершенствование планирования орошения; проведение агрономических мер – глубокая вспашка, применение мульчирования из соломы и других мульч-материалов, а также использование улучшенных штаммов-семян и веществ, повышающих устойчивость к засухе (Jinxia и др., 2007).

В Китае применяются два метода УППВ: недорогие технологии и подземные водохранилища. Первые включают небольшие дамбы на водостоках, обводные каналы, дамбы из искусственных материалов, ямы и водоемы в сельской местности, обводнение кукурузных полей (после сезона дождей) и поворот речного стока к резервным землям, предназначенным для аккумуляции излишков воды во время паводков. Ху и др. (2009) выявили семь регионов Северной Китайской равнины, где могут быть использованы принципы УППВ с использованием недорогих технологий. Все эти регионы относятся к аллювиальным конусам выноса подножия гор Тайханг, где происходит региональное питание подземных вод.

Источниками воды также могут быть городские очищенные сточные воды, а также излишки поверхностных вод, например, из Южного Китая, которые могут транспортироваться через Юго-Северную Систему переброски воды в многоводные годы. Эксперименты по искусственному восполнению подземных вод были осуществлены в некоторых частях Северной Китайской равнины. Первый участок расположен в нижнем течении русла р. Чаобаи. Девять водосливов шириной 300-400 м и высотой 3-5 м установлены в период с 1984 по 1998 г. для замеров водовыпусков с верхнего течения водохранилища Мийу для восполнения подземных вод. Второй участок находится в нижнем течении русла р. Ёнгдай, где в 2001 г. реализовано искусственное питание как неглубоких грунтовых, так и глубоких подземных вод (Jia, You, 2010).

С недавнего времени начали применяться более передовые технологии для восполнения подземных вод. Так, в 2009 г. применялась технология закачки воды в колодцы для пополнения запасов подземных вод в бассейне р. Футуо и верховьях р. Зия. С 20 августа по 7 сентября 2009 г. 18 млн. м<sup>3</sup> воды с верхнего течения водохранилища Хуангбичуанг использовалось для пополнения подземных вод (Jia, You, 2010). На различных территориях Китая построены многоцелевые подземные резервуары – Вангхе в Лайжоу с регулируемой емкостью 56,9 млн. м<sup>3</sup>, на р. Дагу на полуострове Джиаодунг емкостью 238 млн. м<sup>3</sup> и другие (Ishida и др., 2011). Эти резервуары построены путем сооружения подземных дамб цементацией или глиняными стенами.

## Австралия

Неуправляемое питание подземных вод или «намеренная водохозяйственная деятельность, приводящая к поступлению воды в водоносные горизонты, но обычно направленная на утилизацию водных ресурсов, а не на их сохранение» (EPA, 2009), имеет длинную историю во многих городах Австралии.

Практика сбора дождевых вод с крыш (с 1829 г.) или сбора ливневых дождей дренажными колодцами использовалась с 1880-х годов. Однако роль дренажных колодцев в питании подземных вод была оценена значительно позже, а мероприятия по защите качества подземных вод последовательно вводились, начиная с 70-х годов прошлого столетия. В 60-х и 70-х годах широко распространенными системами УППВ в Австралии были поверхностные инфильтрационные системы, предназначенные, прежде всего для сельского хозяйства (Charlesworth и др., 2002). Начиная с 90-х годов, использование одной и той же скважины для закачивания и отбора воды, называемое «хранение в водоносных горизонтах и возврат» (ХВВ), является наиболее распространенным типом УППВ, используемым в Австралии (Parsons и др., 2012). Некоторые примеры использования УППВ в сельском хозяйстве приведены ниже.

Интенсивный отбор подземных вод в период с 1970 по 1990 г. вызвал снижение их уровня и увеличение минерализации во многих частях юга Австралии – Ангас Бремер и долина Баросса в Южной Австралии, и Нижний Бурдекин в Квинсленде (GHD Pty Ltd и AGT Pty Ltd., 2011). Регион Ангас Бремер является важным районом производства высококачественного вина в Южной Австралии, где примерно 80 % оросительной воды поступает на полив виноградников. Отбор подземных вод объемом до 20 млн. м<sup>3</sup> в год до 1980 г. привел к понижению их уровня в региональном масштабе и увеличению их минерализации из-за бокового притока воды более высокой минерализации с соседних территорий, а также минерализованных вод из вышележащих водоносных толщ. С 80-х годов, фермеры проводят эксперименты по отводу вод из рек Ангас и Бремер в ирригационные скважины. Пик деятельности по УППВ отмечен многоводной весной 1992 г., когда 2,4 млн. м<sup>3</sup> воды было закачено в 30 колодцев. Проведенные позднее замеры показали, что уровни подземных вод в регионе поднялись до отметок, не наблюдавшихся здесь с 50-х годов (GHD Pty Ltd и AGT Pty Ltd., 2011).

Другой пример – винодельческая область в долине Баросса, где управление водными ресурсами осуществляется согласно «Плану Распределения Водных Ресурсов». Некоторые виноделы имели право на отбор подземных вод в объеме, недостаточном для орошения дополнительных площадей и не могли получить лицензию на его увеличение. Поэтому они перешли на УППВ. В то время не было ограничений на использование поверхностных вод, доступ к которым был возможен без лицензии. Вода с низкой минерализацией и мутностью откачивалась из реки в резервуар до закачивания в скважину, орошавшую виноградники. Гидрогеологические условия во многих других регионах юга и востока Австралии так же оказались подходящими для восполнения подземных вод.

## США

Применению принципов УППВ в США предшествовала длинная история. Необходимость отвода и хранения излишков поверхностных вод посредством искусственного восполнения подземных вод была осознана в многоводные периоды 80-х годов в Аризоне. Законы, принятые в 1980 и 1986 гг., устанавливали правовую структуру для всех аспектов УППВ, включая право собственности на запасы подземных вод. Эти законы явились основой для важных проектов по искусственному восполнению подземных вод в Аризоне – Проект р. Соленой в Центральной Аризоне и др. С тех пор методы руслового и внеусловного питания подземных вод успешно использовались для хранения водных ресурсов во многих месторождениях подземных вод штата Аризона. Методы рассеивания водных ресурсов с использованием русловых и внеусловных бассейнов широко применяются для накопления больших объемов избыточных поверхностных вод. В 1986 г. в рамках Проекта р. Соленой, являющегося крупнейшим поставщиком воды в г. Финикс, в сотрудничестве с шестью муниципалитетами

столицы была построена и эксплуатируется крупнейшая в штате система подземного magazинирования водных ресурсов. Проект подземного хранения воды Гранитный Риф, расположенный на востоке г. Финикс, является системой рассеивания поверхностной воды, состоящей из семи бассейнов и занимает площадь 150 га. Эта система была построена в сухом русле р. Соленой, изолированное от основного речного потока и находящееся примерно в 5 км ниже водозаборной плотины Гранитный Риф. Емкость этой системы позволяет накапливать в водоносных толщах 250 млн. м<sup>3</sup> воды в год. Питание подземных вод производится водой, доставляемой из рек Соленой, Верде и Колорадо, а также небольшого объема дренажных вод. С 1994 г. этой системой было накоплено в подземных емкостях дополнительно 1,2 млрд. м<sup>3</sup> воды. В 2007 г. этот проект был завершен, после чего начал работу новый Проект Подземного Магазинирования Нью Ривер – Аква Фриа. Эта система, так же использующая поверхностные бассейны для питания подземных вод, имеет емкость для накопления 100 млн. м<sup>3</sup>/год водных ресурсов.

Проект Центральной Аризоны, имеющий права штата Аризона на воду из р. Колорадо объемом 2,7 млрд. м<sup>3</sup>/год и обслуживающий акведуки на р. Колорадо длиной 550 км, имеет систему рассеивания воды для восполнения подземных вод емкостью 460 млн. м<sup>3</sup>/год (Lluria, 2009). Эта система состоит из трех проектов, расположенных возле г. Финикс, трех проектов возле г. Тусон и одного, расположенного между пунктом водозабора в акведуке Проекта Центральной Аризоны на р. Колорадо и г. Финикс. Этот Проект Питания Тонопа обладает емкостью 185 млн. м<sup>3</sup>/год и, в основном, используется для magazинирования водных кредитов штатов Невада и Калифорния в соответствии с соглашением между тремя штатами. Согласно этому соглашению, штат Аризона накапливает квоты на распределение воды р. Колорадо для штатов Невада и Калифорния

в многоводные годы в обмен на квоты на воду р. Колорадо для штата Аризона в засушливые. В засушливые годы штат Аризона получает обратно эти квоты на воду из р. Колорадо, добывая воду из подземных горизонтов системы Проекта Питания Тонопа. Для водоснабжения г. Тусон построены два больших комплекса рассеивания воды суммарной емкостью 185 млн. м<sup>3</sup>/год (Lluria, 2009) и, кроме того, имеется система восполнения подземных вод емкостью 36 млн. м<sup>3</sup>/год под названием Проект Питания Пресной Водой, в котором накапливается только очищенная вода. Частная водная компания Видлер управляет комплексом рассеивания воды объемом 123 млн. м<sup>3</sup>/год возле г. Финикс с целью magazинирования воды для ее продажи в будущем. Пункты питания подземных вод представляют собой бассейны, созданные на месте заброшенных сельскохозяйственных полей с низкой скоростью инфильтрации. Также существует множество других, меньших по размерам, комплексов по рассеиванию воды в Аризоне.

Есть другие примеры таких стран, как Мексика, Испания, Непал и др., где были предприняты шаги по восстановлению истощенных подземных вод при помощи УППВ (Dillon, 2005). На основе анализа опыта применения УППВ в этих странах извлечены следующие основные уроки: 1) заблаговременное планирование УППВ может предотвратить негативные последствия, возникающие в результате чрезмерного отбора подземных вод; 2) существует множество методов УППВ, которые могут быть подобраны в зависимости от конкретных гидрогеологических и социально-экономических условий целевой территории; 3) при выборе УППВ предпочтение должно отдаваться простым методам, хотя более сложные методы так же должны быть рассмотрены; 4) включение УППВ в управление водными ресурсами бассейна рек может принести выгоды, как в местном масштабе, так и в масштабе бассейна.

## Управление питанием подземных вод в Ферганской долине

### Объект исследований

Ферганская котловина – территория, расположенная между горами Курамин и Чаткал на севере, Атойнак и Фергана на востоке и Алай и Туркестан на юге (Ланге, 1964). Ферганская долина, находящаяся в центральной части котловины, ограничена обнажениями мезозойских и палеозойских формаций. В данной работе исследовалась часть Ферганской долины площадью 17 тыс. км<sup>2</sup>, расположенной в пределах Узбекистана. Общая орошаемая площадь составляет 897 тыс. га. Климат долины полупустынный, с низким количеством осадков и высокой температурой летом. Годовой объем осадков изменяется в пределах 100 – 200 мм в центральной части долины и повышается до 300 мм в предгорных областях. Средняя температура воздуха достигает 14°C. Высота над уровнем моря увеличивается с 330 м на западе до 600 м на востоке. Почвы представлены аллювиальными отложениями рек горной зоны. По источникам питания реки Ферганской долины делятся на четыре типа: 1) ледниково-снеговые, 2) снегово-ледниковые, 3) снеговые и 4) снегово-дождевые. Тип питания рек Нарын, Сох и Исфары – ледниково-снеговой, а р. Карадарьи и ее притоков – снегово-ледниковый. Более 55 % орошаемых почв подвержены засолению, из них 71,9 тыс. га – сильнозасоленные почвы.

С. Ш. Мирзаев (1974) в Ферганской долине выделил три гидрогеологические зоны: 1) зону естественного питания и транзита подземных вод (зона А); 2) зону выклинивания подземных вод (зона В); 3) зону рассеивания подземных вод (зона С, рис. 1).

Зона А представляет верхнюю часть конусов выноса малых рек. Реки и оросительные каналы питают подземные воды, залегающие в этой зоне глубоко. Водоносные породы зоны А представлены крупными гравийно-галечниковыми отложениями и создают благоприятные условия для накопления и хранения подземных вод. Эти сильноводопроницаемые отложения постепенно сменяются суглинками и супесями на периферии конуса выноса, представляющую зону С. Между этими двумя зонами расположена узкая зона В, где подземные воды выклиниваются, образуют родники и отводятся в дренажные системы (см. рис. 1). Проницаемость водоносных пластов увеличивается от зоны С к зоне А и изменяется от 50 до 16000 м<sup>2</sup>/сут. С другой стороны, уровень грунтовых вод и засоление почв повышаются от зоны А к зоне С. Отбор подземных вод, достигавший максимального уровня в 4,4 км<sup>3</sup> в начале 90-х годов уменьшился до 2,7-2,8 км<sup>3</sup> к 2005 г. (Мавлонов и др., 2006).

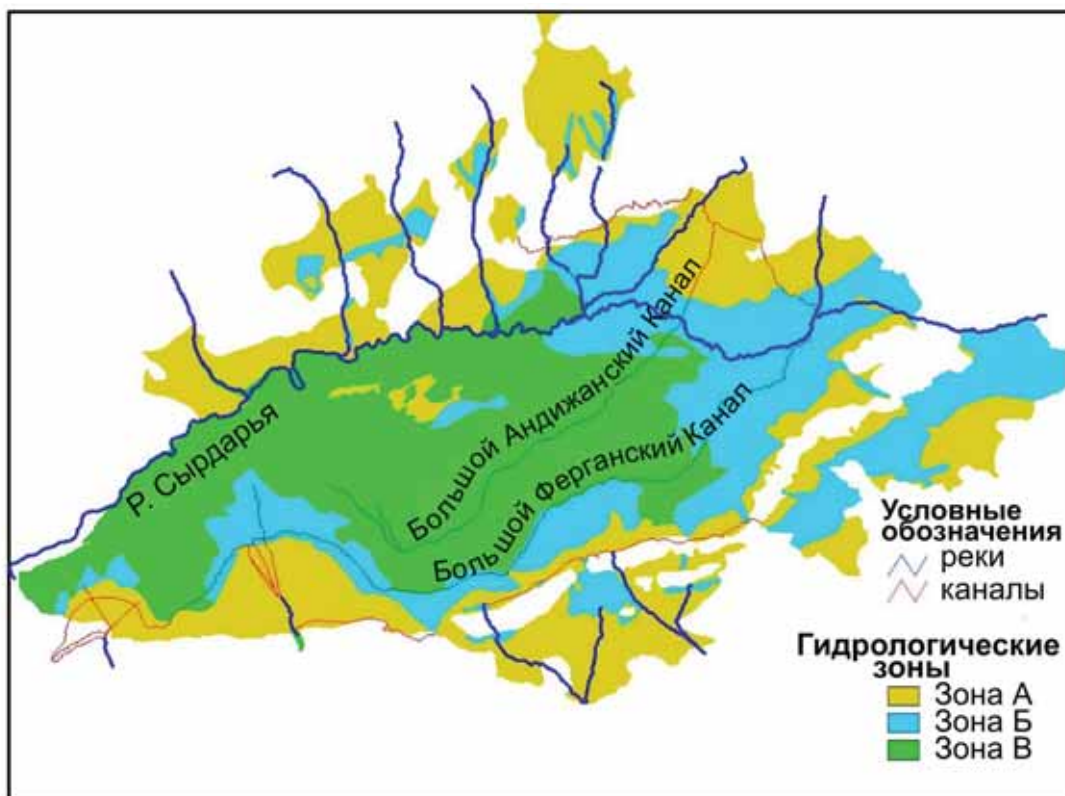


Рис. 1. Гидрогеологические зоны Ферганской долины (Мирзаев, 1974).

## Предлагаемая стратегия управления питанием подземных вод для Ферганской долины

Избыток водных ресурсов в Ферганской долине включает следующие компоненты:

- Зимний сток малых рек. Средний объем стока малых рек, поступающих в Ферганскую долину с 1-го октября по 1-е апреля, составляет примерно 1 млрд. м<sup>3</sup>/год (личная беседа с Юрием Ивановым, консультантом ИВМИ, заведующим отделом Узгидромета, Ташкент, Узбекистан, 2009). В настоящее время этот сток, который частично используется в сельском хозяйстве, питает подземные воды и поступает в р. Сырдарью в качестве возвратного. Переход от орошения поверхностными водами к орошению подземными в бассейнах малых рек и местных водосборных площадях в их верхнем течении и применение водосберегающих технологий обусловит сохранение объема стока в руслах рек, способствуя таким образом увеличению питания подземных вод во вневегетационный период.
- Энергетические попуски воды из водохранилища в верхнем течении р. Нарын. Перевод, в начале 90-х годов, режима работы водохранилища в верхнем течении реки с ирригационного на

энергетический привел к увеличению объема зимних попусков и сокращению летних. Водохранилища, расположенные ниже по течению, не имеют свободных емкостей для хранения излишков зимнего стока из Ферганской долины. Кроме того, наличие ледяного покрова в русле реки не позволяет отводить воду к дельте реки и до Аральского моря. Объем этого дополнительного зимнего стока варьирует от 2 до 3 млрд. м<sup>3</sup>/год в маловодные и многоводные годы, соответственно (Мустафаев и др., 2006).

- Осадки в природной зоне питания подземных вод. Площадь зоны природного питания подземных вод составляет примерно 400 тыс. га (зона А на рис. 1) и включает орошаемые и неорошаемые земли со средним уровнем выпадения осадков в зимний период 126 мм. Общий, доступный для поступления в подземные воды, объем осадков в зоне А составляет 500 млн. м<sup>3</sup>/год. Поскольку в настоящее время объем питания подземных вод от поступления осадков в зимний период оценивается в 100 млн. м<sup>3</sup>/год, применение соответствующих технологий обработки почв, подбор сельскохозяйственных культур и аккумулярование дождевой воды могут значительно увеличить объем этого питания.
- Подземный приток воды с верхнего течения. Подземный приток из орошаемых земель верхнего течения по долинам малых рек оценивается в 950 млн. м<sup>3</sup>/год (Мавлонов и др., 2006). Так как уровень грунтовых вод близок к поверхности земли на большей части исследуемой территории (Духовный и др., 2005), большая часть подземного притока поступает в дренажную сеть и питает р. Сырдарью в зимний период.

Объем водных ресурсов, доступных для УППВ, равен 13-17 % от общего притока воды в Ферганскую долину, составляющего 24,6 – 28,3 млрд. м<sup>3</sup>/год в маловодные

и многоводные годы соответственно. Применение УППВ позволит увеличить отбор подземных вод с 2,7 до 5,0-5,5 млрд. м<sup>3</sup>/год, главным образом, на цели орошения (Мавлонов и др., 2006). Реализация этой стратегии на региональном уровне может быть связана с технологическими решениями различной сложности. Если magazинирование подземных вод в Сохском и Исфаринском месторождениях может вестись с использованием сравнительно простых сооружений таких, как инфильтрационные бассейны, или непосредственно из русла реки, то в других месторождениях (Нарынское), это может потребовать строительства подземных барьеров. Другим подходом является внедрение наряду с мерами по восполнению подземных вод водосберегающих технологий. Этим путем могут быть высвобождены дополнительные подземные емкости в пределах тех месторождений, где восполнение их ресурсов может быть произведено упрощенными методами. Высвобождаемая поверхностная вода может быть использована для улучшения качества подземных вод.

Этот подход отличается от мероприятий, проводимых различными действующими проектами развития в Ферганской долине, нацеленными на получение локальных выгод (Wandert, 2009). Деятельность этих проектов направлена на понижение уровня грунтовых вод путём увеличения дренированности территорий. В результате увеличивается отток возвратных вод в реки в зимний период, когда в нижнем течении нет свободных емкостей для их накопления.

Подход, предлагаемый в данной работе, предусматривает отбор временно накопленных в подземных емкостях в зимний период водных ресурсов на орошение в летний период. Он способствует уменьшению эвапотранспирации, потерь воды в результате оттока в глубинные горизонты и препятствует загрязнению, что будет способствовать получению выгод в региональном масштабе. Предложенная стратегия внедрения УППВ состоит из нескольких шагов:

- *Шаг 1.* 1) Изучить потенциал УППВ в пределах Ферганской долины, определить свободные подземные емкости или создать потенциальные емкости путем интенсивного отбора подземных вод; 2) определить зону и методы управления питанием подземных вод; 3) определить зону, благоприятную для использования подземных вод автономно и в совокупности с поверхностными водами на орошение и выявить методы водосбережения.
  - *Шаг 2.* Усилить отбор подземных вод на орошение с целью снижения их уровня в пределах одного из автономных месторождений подземных вод, распространенных вдоль каналов, транспортирующих воду р. Нарын. Построить инфильтрационные сооружения (бассейны, колодцы, шахты и т.д.) и использовать зимний сток р. Нарын и малых рек Ферганской долины для восполнения подземных вод. Внедрить водосберегающие технологии в зоне питания подземных вод в пределах верхней и средней частей бассейнов малых рек. Использовать сбереженную воду для улучшения водообеспеченности водопользователей среднего течения р. Сырдарьи. Установить малые гидроэлектростанции на каналах для производства электроэнергии для работы скважин. Перепроектировать дренажную сеть с учетом сокращения объема коллекторно-дренажных вод. Реализацию этого подхода предлагается начать с бассейна р. Исфары, расположенного в концевой части Большого Ферганского Канала, поскольку влияние использования водных ресурсов в пределах бассейна р. Исфары на соседние территории незначительно, исключая отвод коллекторно-дренажного стока в р. Сырдарью. Затем перейти к внедрению данного подхода в пределах бассейна р. Сох.
  - *Шаг 3.* Увеличить отбор подземных вод из Сохского месторождения. Перейти от орошения поверхностными водами каналов к совместному использованию поверхностных и подземных вод в бассейне р. Сох и применить водосберегающие технологии (включающие усовершенствованный бороздковый полив и передовые технологии капельного орошения) в верхнем и среднем течении реки. Низкие преграды, дамбы, которые предлагается установить поперек русла реки в верхнем ее течении, будут способствовать увеличению питания подземных вод, что приведет к поддержанию их качества и запасов. В зоне БФК, после понижения уровня грунтовых вод, системы питания подземных вод, такие как инфильтрационные бассейны, скважины и шахты, могут быть установлены вдоль канала с целью инфильтрации зимнего стока р. Нарын в водоносные горизонты. После этого мощность станций по выработке электроэнергии на магистральных каналах может быть увеличена для использования энергии на отбор подземных вод из скважин. Затем можно перейти на следующий суб-бассейн.
  - *Шаг 4.* Когда эта цель будет достигнута для всех отдельных месторождений подземных вод вдоль магистральных каналов и отдельных бассейнов малых рек, можно будет перейти к рассмотрению УППВ на региональном уровне в пределах всей Ферганской долины.
- Последующие разделы описывают первые три шага, прогресс и полученные результаты к настоящему времени. Шаг 4 пока не рассмотрен, поскольку он включает сложные технологические решения и зависит от успешности предыдущих шагов – 1-3.

## Оценка потенциала УППВ в Ферганской долине

### Методы и данные

Оценка потенциала УППВ в Ферганской долине производилась с учетом таких факторов, как потенциал для накопления водных ресурсов в подземных емкостях, уровень и минерализация грунтовых вод, наличие излишков воды и других факторов. Территории с благоприятными для накопления водных ресурсов в подземных емкостях условиями включают части бассейнов малых рек с имеющимися свободными емкостями, а также территории, где такие емкости могут быть созданы путем интенсивного отбора подземных вод или уменьшения их питания посредством применения водосберегающих технологий. Применение водосберегающих технологий будет способствовать снижению концентрации солей в грунтовых водах благодаря сокращению переноса солей из зоны аэрации и увеличению летнего свободного речного стока, доступного для питания подземных вод. Площади, подходящие для magazинирования подземных вод, выявлены на территориях с естественным питанием подземных вод (зона А) и в зоне командования магистральных каналов с проницаемостью водоносных пластов свыше  $300 \text{ м}^2/\text{сут}$  и уровнем грунтовых вод глубже 3 м от поверхности земли.

Источниками воды для УППВ являются: 1) свободный зимний сток малых рек; 2) сток малых рек, высвобождаемый в результате внедрения водосберегающих технологий или усиления отбора подземных вод на орошение; 3) выпадение осадков в зоне А; 4) подземный приток с верхнего течения; 5) зимний сток р. Нарын. Зимний сток малых рек может быть использован для увеличения естественного питания в зоне А, расположенной выше зоны командования каналов. Естественное питание может быть усилено путем увеличения фильтрации воды из речных пойм, русел рек, каналов и потоков. Зимний сток р. Нарын может быть накоплен в водоносных горизонтах путем: 1) увеличения фильтрации воды

из русла каналов; 2) строительства инфильтрационных бассейнов, скважин или шахт. После снижения уровня грунтовых вод открытые дренажные системы, находящиеся в благоприятных геологических условиях, так же могут быть использованы для их питания.

Территории, подходящие для орошения подземными водами или совместного использования поверхностных и подземных вод, могут быть выделены в пределах каждой гидрогеологической зоны на основе оценки проницаемости водоносных горизонтов, глубины залегания и качества грунтовых вод (при первом приближении, оценивается уровень минерализации) в следующем порядке:

- 1) подрайоны или гидрогеологические зоны (см. рис. 1);
- 2) участки или части подземных горизонтов, выделенные на основе водопроводимости водоносного пласта в верхнем 100-метровом слое и разделенные по категориям на несколько групп:
  - участки с низкой проницаемостью отложений менее  $100 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;
  - участки со слабой проницаемостью от  $100$  до  $300 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;
  - участки с хорошей проницаемостью от  $300$  до  $1000 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;
  - участки с высокой проницаемостью свыше  $1000 \text{ м}^2/\text{сут}$ .
- 3) подучастки, выделенные на основе глубины залегания уровня грунтовых вод:
  - подучастки с уровнем грунтовых вод менее 3 м от поверхности земли;
  - подучастки с уровнем грунтовых вод в пределах 3 - 7 м;
  - подучастки с уровнем грунтовых вод в пределах 7 - 12 м;
  - подучастки с уровнем грунтовых вод более 12 м от поверхности земли;

4) микроучастки выделены на основе минерализации грунтовых вод:

- микроучасток с минерализацией грунтовых вод менее 2000 мг/л;
- микроучасток с минерализацией от 2000 до 4000 мг/л;
- микроучасток с минерализацией свыше 4000 мг/л.

Орошение подземными водами может осуществляться на территориях с водопроницаемостью (Т) отложений свыше 300 м<sup>2</sup>/сут при глубине уровня грунтовых вод менее 3 м и их минерализации менее 2000 мг/л. Совместное использование поверхностных и подземных вод рекомендуется для территорий с Т > 300 м<sup>2</sup>/сут и минерализацией менее 4000 мг/л. Остальная территория может орошаться водой из поверхностных источников. На этой площади уровень грунтовых вод залегает ниже 12 м и (или) Т < 300 м<sup>2</sup>/сут. На территориях с проницаемостью пород более 100 м<sup>2</sup>/сут, но менее 300 м<sup>2</sup>/сут, предлагается установка единичных скважин. При районировании земель, орошаемых подземными водами, использовались данные ГП «Институт ГИДРОИНГЕО» и Проектного института «Узгипромелиоводхоз» (Мавлонов и др., 2006; Хасанханова и др., 2006). Районирование выполнено с использованием ГИС-технологий; создано несколько тематических слоев в среде ГИС: гидрогеологические зоны, удельный дебит воды, проницаемость пород, глубина залегания уровня и минерализация грунтовых вод и др. Баланс подземных вод рассчитан на маловодный (2001) и многоводный (1995) лет для каждого водоносного слоя Ферганской долины с целью определения потенциала отбора подземных вод на исследуемых территориях.

## Результаты

Данные, представленные в табл. 1, показывают, что свободные емкости превышают 3 млрд. м<sup>3</sup> в зоне А и могут

быть использованы для аккумуляции зимнего стока малых рек, составляющего 1 – 1,2 млрд. м<sup>3</sup>/год. Подземные воды, в основном, могут быть использованы для орошения озимых культур. Орошаемые земли на данной территории расположены выше зоны командования магистральных каналов, транспортирующих воду из р. Нарын в маловодные районы Ферганской долины. Доступные свободные емкости, а также емкости, которые могут быть созданы в пределах зоны командования магистральных каналов, показаны на рис. 2 и в табл. 2.

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что объем свободных подземных емкостей в зоне магистральных каналов, доступный для накопления воды, равен 760 млн. м<sup>3</sup>. Дополнительные емкости, которые могут быть высвобождены в результате понижения уровня грунтовых вод, оцениваются в 186 млн. м<sup>3</sup> на каждый метр понижения уровня. Эти данные указывают на то, что подземные емкости для магазинирования зимнего стока рек имеются. Вместе с тем оптимальные объемы восполнения и отбора подземных вод могут быть оценены путем тщательного экономического анализа и моделирования каждого месторождения. Перед УППВ необходимо увеличить отбор подземных вод с целью понижения глубины залегания грунтовых вод. Площади, подходящие для орошения подземными водами и совместного использования поверхностных и подземных вод в Ферганской долине, показаны на рис. 3, а.

Расчеты показывают, что площади, пригодные для орошения подземными водами и совместного использования поверхностных и подземных вод, равны 290 тыс. и 243 тыс. га, соответственно. Остальная часть земель может орошаться за счет поверхностных источников. Потенциальные объемы отбора подземных вод зависят от гидрогеологических условий (зоны А и В) и восполняемых ресурсов подземных вод. Общий объем питания подземных вод в зонах А и В (см. рис. 1) оценен в пределах от 5,624 до 6,005 млрд. м<sup>3</sup>/год в маловодные и многоводные годы соответственно.

Таблица 1

Свободные емкости месторождений подземных вод Ферганской долины (Мавлонов и др. 2006).

| Месторождение        | Зона питания              |                                       |
|----------------------|---------------------------|---------------------------------------|
|                      | Площадь <sup>а</sup> , га | Свободные емкости, млн м <sup>3</sup> |
| Алмаз-Варзское       | 19,825                    | 231                                   |
| Кукумбайское         | 2,658                     | 54                                    |
| Касансайское         | 4,351                     | 30                                    |
| Исковат-Пишкаранское | 19,439                    | 359                                   |
| Сохское              | 34,589                    | 1,452                                 |
| Алтыарык-Бешалышское | 7,366                     | 28                                    |
| Наманганское         | 5,196                     | 77                                    |
| Исфаринское          | 4,385                     | 90                                    |
| Майлисуйское         | 17,513                    | 22                                    |
| Караунгурское        | 3,944                     | 5                                     |
| Нарынское            | 28,393                    | 167                                   |
| Чуст-Папское         | 7,936                     | 147                                   |
| Андижан-Шахриханское | 7,919                     | 16                                    |
| Чимиен-Авальское     | 3,651                     | 88                                    |
| Ош-Араванское        | 21,223                    | 324                                   |
| Нанайское            | 4,349                     | 71                                    |
| Всего                | 192,737                   | 3,159                                 |

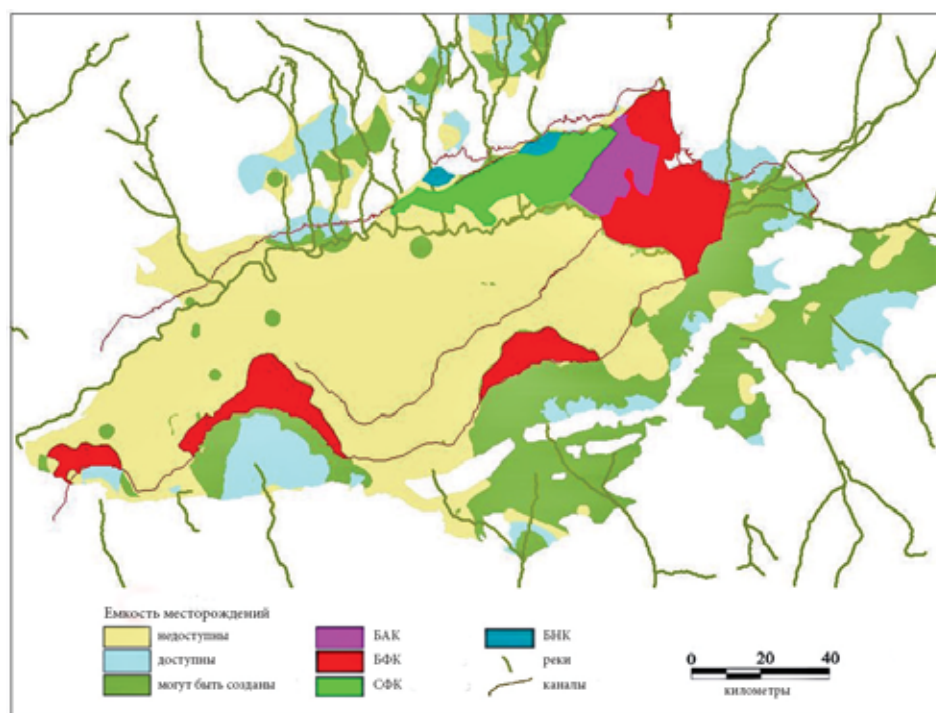
Примечание: <sup>а</sup> площади в пределах зоны питания и транзита подземных вод, где имеются свободные емкости

Рис. 2. Зоны с благоприятными гидрогеологическими условиями для аккумуляции зимнего стока р. Нарын (Karimov и др., 2010). Примечание: БАК – Большой Андижанский Канал, БФК – Большой Ферганский Канал, СФК – Северный Ферганский Канал, БНК - Большой Наманганский Канал.

Таблица 2

Свободные и потенциальные подземные емкости в Ферганской долине для аккумуляции зимнего стока р. Нарын

| Месторождение            | Источник питания ПВ (канал) | Площадь <sup>а</sup> , га | Свободная емкость, млн. м <sup>3</sup> | Потенциальная емкость на 1 м снижения УГВ, млн. м <sup>3</sup> /м |
|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Нарын                    | БФК                         | 36,859                    | 158                                    | 37                                                                |
| Нарын                    | БАК                         | 24,440                    | 52                                     | 24                                                                |
| Нарын                    | СФК                         | 23,769                    | 85                                     | 24                                                                |
| Наманган                 | СФК                         | 20,228                    | 181                                    | 19                                                                |
| Наманган                 | БНК                         | 5,371                     | 77                                     | 5                                                                 |
| Майлису                  | БФК                         | 20,547                    | 5                                      | 20                                                                |
| Андижан-Шахриханское     | БФК                         | 4,443                     | 0                                      | 4                                                                 |
| Алтыарык-Бешалышское     | БФК                         | 17,171                    | 0                                      | 17                                                                |
| Сохское                  | БФК                         | 27,561                    | 126                                    | 28                                                                |
| Исфаринское              | БФК                         | 8,828                     | 85                                     | 8                                                                 |
| <b>Суммарная емкость</b> |                             |                           | <b>769</b>                             | <b>186</b>                                                        |

<sup>а</sup>Площадь земель, где имеются или могут быть созданы свободные емкости путем понижения уровня грунтовых вод. БАК – Большой Андижанский Канал, БФК – Большой Ферганский Канал; СФК – Северный Ферганский Канал; БНК – Большой Наманганский канал

Расширение площадей с совместным использованием поверхностных и подземных вод и внедрение водосберегающих технологий (рис. 3, б) приведет к уменьшению питания подземных вод в летний период из-за сокращения потерь из каналов и с орошаемых полей. Дефицит питания подземных вод (~1 млрд. м<sup>3</sup>/год) может быть компенсирован за счет зимнего стока р. Нарын и малых рек. Представленные выше данные указывают на потенциальные возможности применения УППВ на региональном уровне, следующий шаг направлен на оценку потенциала УППВ на уровне отдельного месторождения.

Река Исфара образуется в результате таяния ледников и снежников на Алайских горах. Среднегодовой сток реки составляет 14,7 м<sup>3</sup>/с. БФК пересекает конус выноса Исфары в его головной части, что позволяет использовать простые системы для питания подземных вод поверхностной водой. Просачивание воды из БФК, русла реки, водотоков и из широко-разветвленной сети ирригационных каналов является основным источником питания подземных вод бассейна р. Исфары. Гравийно-галечниковые отложения мощностью более 100 м, распространенные

в верхней части бассейна реки, создают благоприятные условия для питания подземных вод. На севере Большого Ферганского канала, гравийно-галечниковые отложения постепенно замещаются суглинками и супесями. Подземные воды текут на северо-восток в русло р. Сырдарьи и на северо-запад в Кайракумское водохранилище. Минерализация грунтовых вод составляет менее 1000 мг/л в верхней части бассейна и 1000 - 3000 мг/л на периферии; на некоторых изолированных участках минерализация грунтовых вод превышает 3000 мг/л. Орошаемые земли распространены в верхней части бассейна на юге от БФК (которые получают воду из р. Исфары и частично из БФК, поднимаемую на эти земли насосами), а также на периферии конуса выноса реки, орошаемые из БФК. Отбор подземных вод на орошение составляет 53 млн. м<sup>3</sup>/год, что намного меньше 600 млн. м<sup>3</sup>/год, подаваемого из системы каналов. В верхней части бассейна фермеры занимаются, главным образом, садоводством и выращивают промежуточные культуры (овощи, бобовые, кукурузу и сорго на силос), тогда как в нижней части в зоне командования БФК они выращивают, в основном, хлопок и озимую пшеницу.

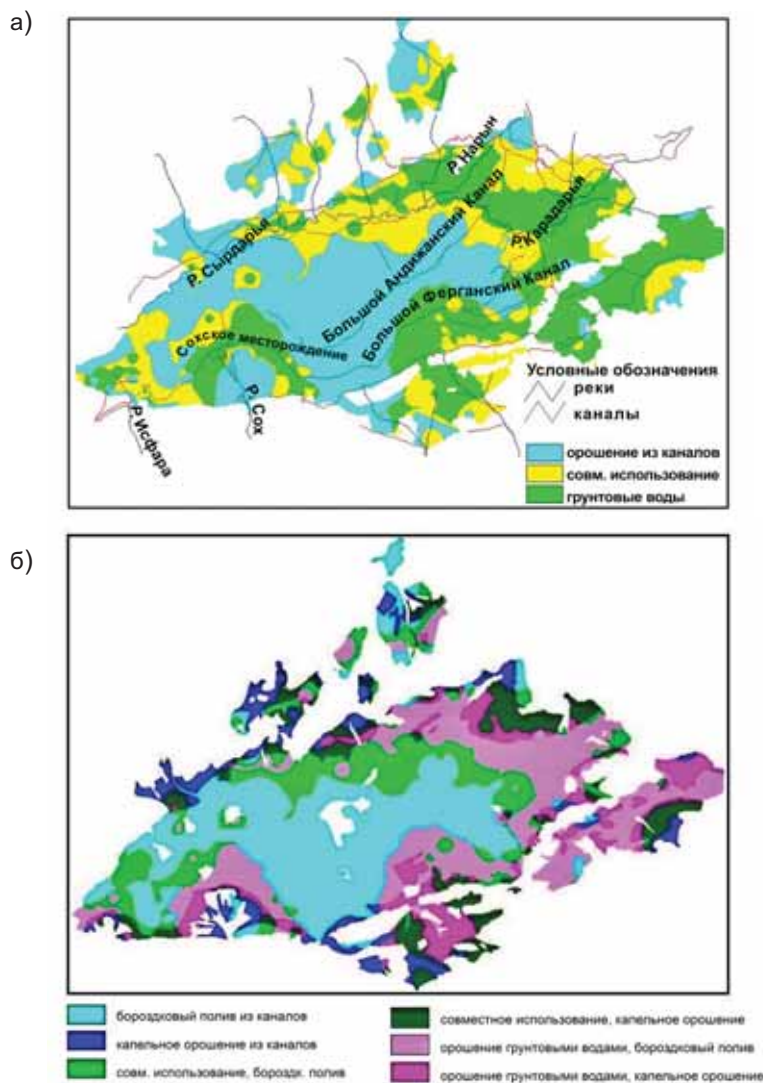


Рис. 3. Зоны с благоприятными условиями для орошения подземными водами (а) и внедрения водосберегающих технологий (б).

## Полевые эксперименты по искусственному восполнению подземных вод

### Методы и данные

В верхнем течении р. Исфары испытан простой метод восполнения подземных вод. В этом исследовании в качестве инфильтрационного бассейна использовался один из заброшенных котлованов, имеющих вдоль БФК, размером 40 м x 25 м x 2 м (рис. 4). Почвенный разрез

на выбранном участке представлен гравийно-галечниковыми отложениями, заполненными песком, и являлся репрезентативным для территории вдоль БФК в верхнем течении реки (рис. 4, в). Эксперимент по питанию подземных вод осуществлялся в две стадии. На первой, с 1 по 17 апреля 2010 г. вода из БФК фильтровалась в подземные горизонты

из инфильтрационного бассейна площадью 0,1 га. Перед экспериментом стены и дно бассейна были спланированы. На дне бассейна установлены два уровнемера для мониторинга уровня воды в котловане. Воду в бассейн подавали без предварительного осветления.

Расход подаваемой воды замерялся с использованием метода фиксированного русла. Измерения проводились один раз в час в дневное время и три раза в ночное. Всего было установлено 11 наблюдательных скважин для контроля уровня грунтовых вод, скважины расположены на расстоянии 100 – 1000 м от инфильтрационного бассейна. Испарение с зеркала воды в котловане определялось испарометром, установленным рядом с инфильтрационным бассейном. Данные об осадках получены с ближайшей метеостанции. Концентрацию взвешенных частиц замеряли в лабораторных условиях, используя метод отстаивания ила. Образцы почвы отбирались со дна траншеи с глубины 0-25, 25-50, 50-75 и 75-100 см до и после начала эксперимента по восполнению подземных вод. Определялись механический состав, растворенные соли, содержание гипса и карбонатов при помощи стандартных методов, используемых в регионе (Аринушкина, 1970).

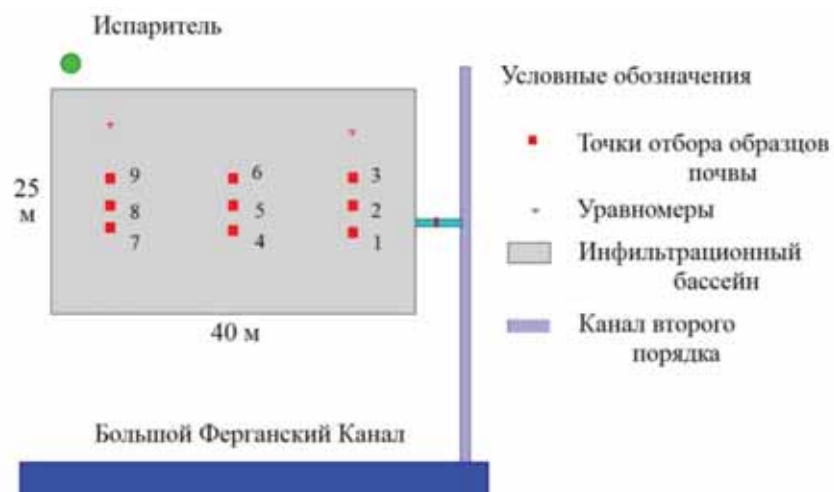
Вторая стадия УППВ проводилась в период с 26 марта по 26 апреля 2011 г. В отличие от эксперимента первой стадии, во второй перед инфильтрационным бассейном были установлены два отстойника диаметром 3 м и глубиной 1 м для отстаивания ила. Дополнительно к имеющимся наблюдательным скважинам установлены еще три, оборудованные измерительными приборами – дайверами, ежечасно регистрировавшими уровень воды, на расстоянии 3, 30 и 35 м на севере от бассейна. Дайверы установлены 5 апреля и демонтированы 31 мая 2011 г. До проведения второй стадии эксперимента наносы, накопившиеся на дне бассейна, были собраны и транспортированы к ближайшим

орошаемым полям. Скорость инфильтрации измерялась в трех повторностях до и после начала эксперимента с использованием метода инфильтрационных колец. Скорость инфильтрации замерялась в начале, середине и конце инфильтрационного бассейна через 1, 5, 10, 15, 30, 45 и 60 мин. после начала эксперимента, а затем замеры проводились каждые 30 мин. Измерения продолжались до тех пор, пока не была достигнута постоянная скорость инфильтрации, наблюдавшаяся после 6,5 до 8,5 ч. после начала эксперимента. После тестирования УППВ на пилотном участке, magazинирование подземных вод моделировалось в пределах всего бассейна р. Исфары.

## Результаты и обсуждение

Стадия 1. Первого апреля 2010 г., вода из БФК поступила в инфильтрационный бассейн. Из-за высокой проницаемости отложений дно бассейна покрылось водой только на третьи сутки эксперимента. Уровень воды в бассейне стабилизировался на отметке 58 см на пятые сутки, не изменяясь в течение последующих 10-ти суток. После прекращения водоснабжения вода из бассейна исчезла через 3 суток. Скорость инфильтрации была максимальной в первые 3 дня, превышая 4,5 м/сут, затем стабилизировалась на уровне 2-3,5 м/сут начиная с четвертых суток до конца эксперимента (рис. 5). Небольшие регулярные колебания уровня инфильтрации воды могут быть объяснены высокой скоростью притока в бассейн, особенно в первые трое суток во время начальной стадии инфильтрации, когда возникали волны, а также из-за высокой мутности воды. Ежедневные наблюдения за уровнем воды показали, что уровень грунтовых вод поднялся на 35-45 см на расстоянии 250 м от инфильтрационного бассейна (рис. 6).

а)



б)



в)



Рис. 4. Искусственное восполнение подземных вод р. Исфары с использованием воды из БФК (апрель, 2010)

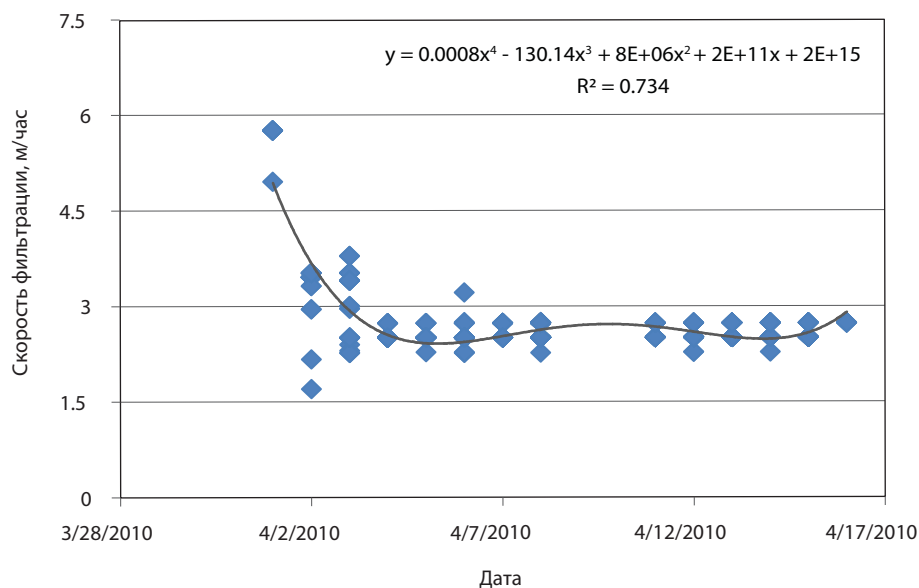


Рис. 5. Скорость инфильтрации (м/сут) во время эксперимента по восполнению подземных вод в верхнем течении р. Исфары.

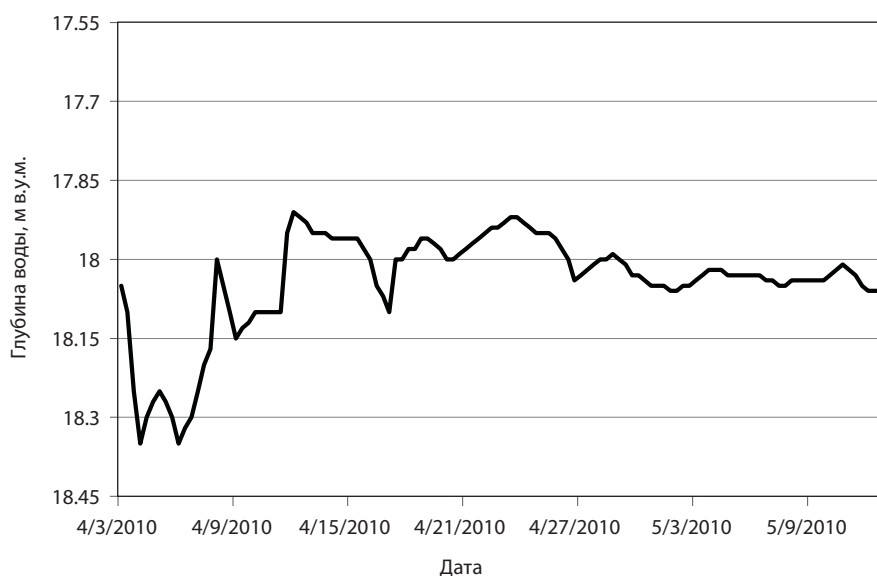


Рис. 6. Изменение глубины залегания уровня грунтовых вод под влиянием их искусственного восполнения. Примечание: Скважина 1\* расположена в 250 м от инфильтрационного бассейна

Всего в инфильтрационный бассейн было подано 40 тыс. м<sup>3</sup> воды, из которых 2 тыс. м<sup>3</sup> испарилось, а 38 тыс. м<sup>3</sup> просочилось в подземные воды. Этот объем водных ресурсов весьма значителен, если учесть малую продолжительность проведения эксперимента и небольшие размеры инфильтрационного бассейна. Так как длина БФК в бассейне р. Исфары составляет не менее 15 км, примерно 150 подобных инфильтрационных

бассейнов для питания подземных вод можно построить вдоль БФК. Потенциал УППВ в пределах бассейна р. Исфары оценен путем моделирования функционирования этих сооружений.

Во избежание переоценки потенциала питания подземных вод на стадии перехода от пилотного участка (0,1 га) на уровень суб-бассейна (15 га), скорость питания подземных вод, использованная в моделировании,

уменьшили в 1,5 – 2 раза по сравнению со значениями, полученными на пилотном участке.

Исследования на экспериментальном участке по восполнению подземных вод выявили риск, связанный с высокой мутностью воды БФК (табл. 3). Из табл. 3 видно, что сумма илистых частиц (диаметром от 0,002 до 0,05 мм) и глинистых частиц (диаметром менее 0,002 мм) превышает 95 % всех взвешенных частиц, содержащихся в воде канала. Эти данные указывают на возможный риск закупоривания пор почв. Несмотря на это, анализ гранулометрического состава по завершению эксперимента показал, что основная часть илистых и глинистых частиц отложилась на дне бассейна выше поверхности почвы, и только малая ее часть

– в профиле. Мощность наносов составила 10 см в головной части, 7 см в средней и 3 см в концевой части бассейна (табл. 4).

Механический состав почв (табл. 4) по состоянию на ноябрь 2010 г. указывает на содержание частиц ила и глины в профиле почвы после проведения эксперимента перед наступлением дождей. Осажденные частицы образовали отдельный слой на поверхности почвы и могут быть легко удалены из бассейна после завершения эксперимента с УППВ. Данные по состоянию на март 2011 г. представляют содержание илистых и глинистых частиц после сезона дождей. Сравнение содержания илистых и глинистых частиц в почвенном профиле в инфильтрационном бассейне до и после сезона дождей указывает на его увеличение

Таблица 3

Механический состав образцов почвы со дна инфильтрационного бассейна.

| Место отбора образцов     | Глубина, см | Ноябрь 2010 г.       |                               |                          | Март 2011                |
|---------------------------|-------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                           |             | Частицы, (%)         |                               |                          |                          |
|                           |             | песок<br>(> 0.05 мм) | илистые<br>(0,002 до 0,05 мм) | глинистые<br>(< 0,002мм) | глинистые<br>(< 0,002мм) |
| Взвешенные частицы, БФК   |             | 5,6                  | 69,4                          | 25,0                     |                          |
| Контроль                  | 0-10        | 57,2                 | 34,9                          | 7,9                      | 5,6                      |
|                           | 10-25       | 77,6                 | 18,2                          | 4,5                      | 2,6                      |
|                           | 25-35       | 84,8                 | 12,3                          | 2,9                      | 0,7                      |
|                           | 35-50       | 85,0                 | 12,3                          | 2,9                      | 0,7                      |
| Инфильтрационный бассейн  | Наносы      | 11,7                 | 76,3                          | 12                       | 15,3                     |
| Головная часть<br>М=10 см | 0-10        | 85,2                 | 11,9                          | 2,9                      | 3,2                      |
|                           | 10-25       | 88,4                 | 9,2                           | 2,4                      | 9,6                      |
|                           | 25-35       | 89,7                 | 7,9                           | 2,4                      | 1,5                      |
|                           | 35-50       | 86,8                 | 10,6                          | 2,6                      | 1,5                      |
| Середина<br>М=5 см        | Наносы      | 11,1                 | 67,5                          | 21,4                     | 33,0                     |
|                           | 0-10        | 85,0                 | 12,0                          | 3,0                      | 7,9                      |
|                           | 10-25       | 86,8                 | 10,6                          | 2,6                      | 7,6                      |
|                           | 25-35       | 87,2                 | 10,1                          | 2,7                      | 0,6                      |
| Концевая часть<br>М=3 см  | 35-50       | 92,2                 | 6,9                           | 0,9                      | 0,6                      |
|                           | Наносы      | 15,4                 | 62,3                          | 22,3                     | 36,4                     |
|                           | 0-10        | 79,2                 | 16,1                          | 4,7                      | 10,4                     |
|                           | 10-25       | 83,9                 | 12,8                          | 2,9                      | 0,5                      |
|                           | 25-35       | 85,6                 | 12,1                          | 2,3                      | 0,8                      |
|                           | 35-50       | 85,6                 | 11,3                          | 2,1                      | 0,8                      |

Примечание: \*Каменистые частицы были удалены до анализа механического состава почв, М – мощность наносов в инфильтрационном бассейне.

Таблица 4

Механический состав наносов на дне инфильтрационного бассейна (2011 г).

| Бассейн                      | Частицы           |                    |                    |
|------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
|                              | песок (1-0,05 мм) | ил (0,05-0,002 мм) | глина (< 0,002 мм) |
| Начало котлована (M = 18 см) | 4                 | 69                 | 27                 |
| Средняя часть (M = 7 см)     | 5                 | 55                 | 40                 |
| Концевая часть (M = 2 см)    | 5                 | 54                 | 41                 |

в слое почвы 0-25 см в зимний период (табл. 4). Если во время эксперимента восполнения подземных вод глинистые частицы накапливались, главным образом, на поверхности почвы, то в сезон дождей они перераспределились по профилю.

Несмотря на высокое содержание мелких частиц в воде БФК, их перераспределение в почвенном профиле происходило, главным образом, в течение сезона дождей после завершения эксперимента по восполнению подземных вод. Эти данные подчеркивают необходимость удаления наносов из инфильтрационных бассейнов до начала сезона дождей.

Стадия 2. Второй эксперимент по искусственному восполнению подземных вод проведен в период с 26 марта по 26 апреля 2011 г. Концентрация взвешенных частиц составила 2030, 1887, 62 и 30 мг/л в воде БФК, во втором отстойнике, в средней и концевой частях инфильтрационного бассейна соответственно. К концу эксперимента содержание взвешенных частиц составило 807, 783, 327 и 43 мг/л в БФК, во втором отстойнике, в головной и концевой частях инфильтрационного бассейна соответственно. Отмечено, что несмотря на наличие отстойников, установленных перед инфильтрационным бассейном, концентрация взвешенных частиц в головной части бассейна была все еще высокой. Анализ механического состава взвешенных частиц в воде БФК показал, что содержание илистых частиц составило 68 %, глинистых – 31,3 %. На второй стадии эксперимента в 2011 г. мощность наносов составила 18 см в головной и только 2

см – в концевой части бассейна (табл. 3).

В целом, в период с 26 марта по 26 апреля 2011 г. объем воды, просочившейся из инфильтрационного бассейна в подземные воды, составил 20,2 тыс. м<sup>3</sup>, а испарение с зеркала грунтовых вод в течение эксперимента – 139 м<sup>3</sup>. Подъем уровня грунтовых вод, замеренного в скважине, оборудованной микродайдером, показан на рис. 7.

Уровень грунтовых вод поднялся на 30-35 см в скважине, расположенной вблизи инфильтрационного бассейна (рис. 7). Подъем уровня грунтовых вод в скважинах, расположенных в 30 и 35 м от инфильтрационного бассейна, составил около 10 см. Балансовые расчеты подтвердили, что скорость инфильтрации во время стадии 2 была меньшей, чем во время стадии 1, несмотря на большую продолжительность второй стадии по времени. Объем питания подземных вод во время стадии 1 был вдвое больше, чем во время стадии 2. Причинами этого являются: 1) меньший расход воды, поступавшей в бассейн и, следовательно, меньший напор воды в бассейне; 2) позднее удаление наносов из инфильтрационного бассейна после сезона дождей. Результаты данного исследования указывают на важность удаления наносов сразу после завершения экспериментов по восполнению подземных вод без задержки, до начала сезона дождей. Несмотря на эти ограничения, натурные исследования показали, что инфильтрационные сооружения вдоль БФК имеют хороший потенциал для восполнения подземных вод. Это положение в дальнейшем было проверено посредством моделирования подземных вод.

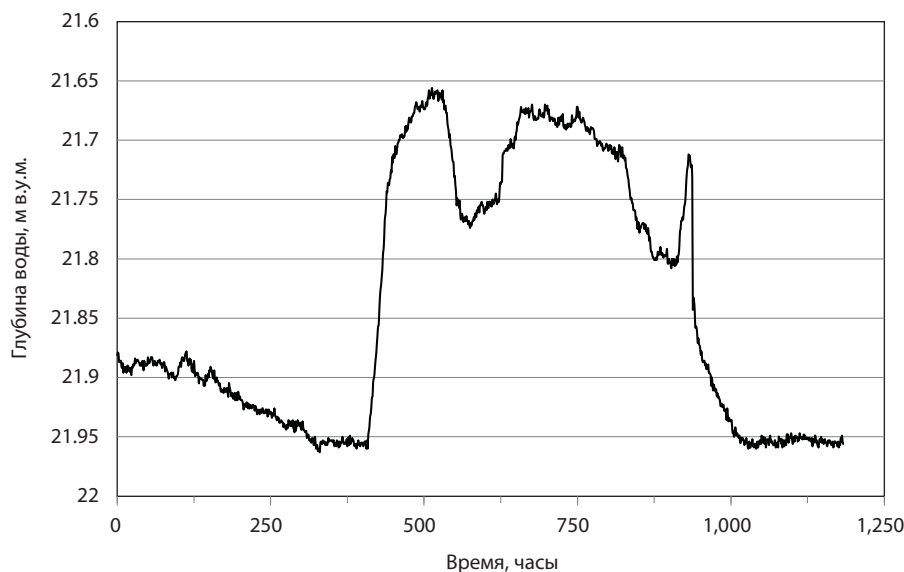


Рис. 7. Изменение глубины залегания уровня грунтовых вод в результате искусственного восполнения подземных вод (март, апрель 2011 г.). Примечание: скважина 2\* расположена в 3 м от инфильтрационного бассейна.

## Моделирование УППВ

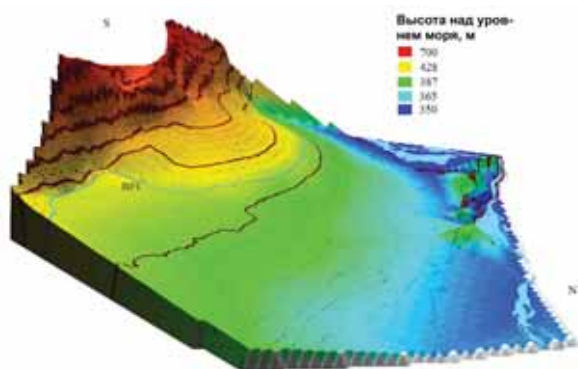
### Описание модели

Трехмерная модель водоносного бассейна р. Исфары (рис. 8, а) построена с использованием программного комплекса Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic Inc. 2000). Visual MODFLOW – широко используемая версия трехмерной конечно-разностной модели подземных вод американской геологической службы, работающая на платформе Microsoft Windows (Harbaugh и McDonald, 1996). Модель подземных вод бассейна р. Исфары покрывает площадь примерно 380 км<sup>2</sup>. Расчетная сетка модели имеет шаг 50 м x 100 м, а в зоне густой сети оросительных каналов и дренажа шаг сокращается до 50 м x 50 м.

Граничные условия модели представлены на основании результатов

гидрогеологических исследований, проведенных ГП «Институт ГИДРОИНГЕО» (личная беседа с Мирюсуповым, главным гидрогеологом института, 2010). Зеркало грунтовых вод являлось верхней границей питания. Суглинисто-глинистый слой, залегающий на глубине 300 м, принят как непроницаемая граница и представлял нижнее граничное условие модели. На юге задан постоянный расход, моделирующий подземный приток с горной территории через долину реки. Уровень подземных вод на северо-востоке определялся подпитыванием из р. Сырдарьи, а на северо-западе задан границей постоянного напора. На юге имеется зона естественного питания подземных вод, а на север от БФК – зона разгрузки (рис. 8, б).

а)



б)

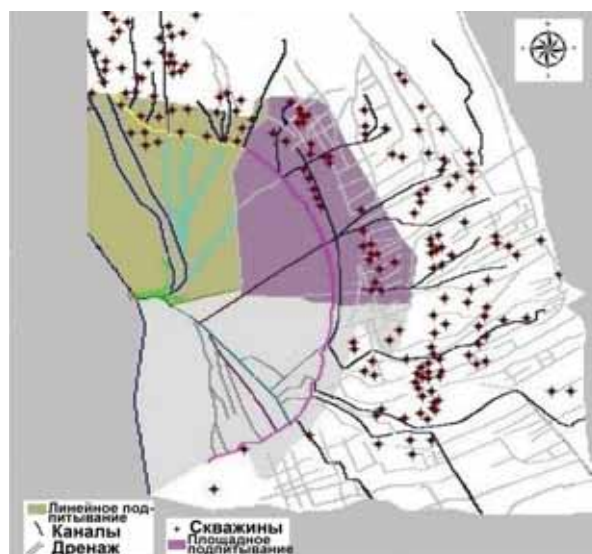


Рис. 8. Трехмерный вид (а) и план (б) модели водоносного бассейна р. Исфары (Karimov и др. 2012).

Модель состоит из восьми слоев; первый, третий, пятый и седьмой слои представлены гравийно-галечниковыми отложениями в зоне питания и суглинком и супесью в зоне разгрузки. Подземные воды безнапорные в зоне питания и напорные в зоне разгрузки в слоях со второго по восьмой. Основные каналы и водотоки верхней части представлены в модели как граничное условие «Питание» из-за глубокого залегания уровня грунтовых вод. Каналы, распространенные в зоне разгрузки, являются граничным условием «Река», поскольку они питают подземные воды в летний период и дренируют их в зимний. Питание грунтовых вод также включает потери воды на просачивание от осадков и инфильтрационные потери поливной воды. Величина инфильтрационных потерь зависит от типа почв и сельхозкультур, и уровня подземных вод, представленного в модели ежемесячно. БФК в модели имеет глубину 2 м и ширину 5 м. Глубина воды в канале составляет 1,5 м, а толщина отложений на дне канала – 0,3 м. Данные о первоначальной глубине уровня грунтовых вод получены из базы данных ГП «Институт ГИДРОИНГЕО».

Исходный уровень грунтовых вод был на глубине 20 м от поверхности земли в зоне питания и 1 – 2 м на севере БФК.

Начальные значения параметров определены по результатам опытных откачек, проведенных Институтом ГИДРОИНГЕО на исследуемой территории в 1980-1985 гг. В то время проведены 13 тестовых откачек, включая 9 в безнапорной и 4 в напорной зонах. Расположение наблюдательных скважин зависело от гидрогеологических условий. Для однородного профиля число установленных скважин составляло 2-3 в верхнем течении, 3-4 в зоне родников и 4-10 на периферии бассейна с напорными подземными водами. Тестовые откачки проводились с фиксированными расходами скважин для упрощения анализа полученных данных. Откачка проводилась с расходом от 25 до 100 л/с и понижением уровня грунтовых вод в скважине на 3-4 м. Величины расходов в скважинах были выбраны для достижения квазистационарного режима и понижения уровня грунтовых вод до 20 см в отдаленной скважине после 5-10 сут. Продолжительность опытов по откачке составляла 10-15 сут. в безнапорной зоне

и 15-20 сут. в напорной зоне. Понижение уровня грунтовых вод фиксировалось каждые 1-10 мин. в начале откачки и три раза в сутки на конечных стадиях в отдаленной скважине. Гидрогеологические параметры оценивались по данным на периоды понижения и восстановления уровня грунтовых вод посредством аналитических решений уравнения Тейса. Согласно этим оценкам, проницаемость водоносных пород изменяется в пределах 40 – 555 м<sup>2</sup>/сут., а коэффициент водоотдачи – от 0,13 до 0,22 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> в безнапорной зоне и 0,0001 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> в напорной.

### **Калибровка и проверка модели**

Упрощенные модели с использованием Visual MODFLOW созданы для каждой из 13-ти скважин, в которых проводились опытные тесты на откачку. Размер каждой модели 1000 x 1000 м. Упрощенные модели представлены восемью слоями наподобие слоев главной модели водоносного бассейна р. Исфары. Размеры сетки модели неоднородны – 5 м около скважин, увеличиваясь до 20 м в направлении к ее границе. В целом, модель состояла из 100 рядов и 100 колонок. Граница модели принята как площадь постоянного напора, исходя из предположения, что краткосрочная откачка не повлияет на уровень воды на расстоянии 500 м от скважин. Слабопроницаемый слой глины на глубине 300 м принят как непроницаемый, представляя нижнюю границу модели. Сначала модель решалась с использованием значений параметров коэффициента фильтрации и водоотдачи, определенных аналитическим решением уравнения Тейса. Позднее параметры модели были определены с помощью модуля WINPEST, включенного в пакет Visual MODFLOW (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2000). Целью использования модуля WINPEST была корректировка значений параметров путем увеличения сходимости с фактическими данными, полученными во время тестовых откачек. Сравнение фактических данных и данных, полученных

при расчетах с использованием модели, дало коэффициент корреляции в пределах 0,85-0,95. Коэффициенты фильтрации и водоотдачи скорректированы на основе параметров, полученных с WINPEST. Многолетние данные о балансе подземных вод, полученные Институтом ГИДРОИНГЕО с 1 апреля 1981 г. по 1 апреля 1983 г., впоследствии использовались для калибровки модели. Фактические значения баланса подземных вод и уровни их залегания сравнивались с результатами моделирования. Сравнение показало высокую сходимость результатов. Значение коэффициента корреляции составило 0,989. Изменения составляющих баланса подземных вод (отбор подземных вод, их питание и испарение) с 1980 г. были включены в формулировку сценариев моделирования.

### **Сценарии моделирования**

Рассмотрены четыре альтернативных сценария управления питанием водных ресурсов:

Сценарий 1 (Сц1). В базовом сценарии моделируются современные тенденции отбора подземных вод на орошение. Ресурсы подземных вод сохраняются для целей водоснабжения населения и промышленности, а также для покрытия дефицита поливной воды. Отбор подземных вод производится на минимальном уровне в 1,7 м<sup>3</sup>/с, при этом число скважин составляет 190 (рис. 9а).

Сценарий 2 (Сц2). Совместное использование поверхностных и подземных вод на орошение. Этот сценарий предлагает увеличение использования подземных вод на орошение в верхней части системы и орошение водой БФК в нижнем течении. Отбор подземных вод в летний период предусмотрен на уровне ежегодного питания подземных вод. Число скважин составляет 230 шт., из которых 40 шт. размещены линейно на расстоянии 0,5-2 км к северу и югу от БФК. Этот сценарий нацелен на получение локальных выгод – больше водных ресурсов, доступных на орошение в бассейне р. Исфары, но без водосбережения для территорий,

расположенных в нижнем течении р. Сырдарьи.

Сценарий 3 (Сц3). Отбор подземных вод превышает современное годовое питание на 20 % и нацелен на понижение уровня грунтовых вод по периферии бассейна и предотвращение заболачивания и засоления земель.

Сценарий 4 (Сц4). Управление питанием подземных вод. Отбор подземных вод, как в Сценарии 3, и дополнительно накопление в водоносных емкостях 100 млн. м<sup>3</sup>/год зимнего стока р. Нарын. Данный сценарий предусматривает использование водных ресурсов, накопленных в зимний период для орошения в летний. Этот сценарий предполагает многолетнее регулирование запасов подземных вод путем магазинирования зимнего стока каждые два года из трех, начиная с пятого года интенсивного отбора. Инфильтрационные бассейны моделируются вдоль БФК. Расположение скважин показано на рис. 9, б.

Моделирование выполнено по каждому сценарию на 13 лет, начиная с 2011 г., при этом режим отбора грунтовых вод в сценарии 1 был фиксированным, сезонные изменения учтены в сценарии 2, а многолетние изменения – в сценариях 3 и 4 (рис. 10).

## Результаты моделирования

Результаты моделирования, показанные на рис. 11, указывают на высокий уровень залегания грунтовых вод при базовом сценарии (Сц1) и формирование свободных емкостей в сценарии 2. Существенное понижение уровня грунтовых вод в сценарии 3 является следствием интенсивного отбора подземных вод, превышающего их питание. Режим сработки и заполнения подземного водохранилища показан на рис. 12.

По сценарию 1 (Сц1) при минимальных отборах подземных вод на орошение, заполняются водоносные емкости в летний период и срабатываются в зимний в результате подземного оттока и выклинивания в дренаж. Интенсивный отбор подземных вод

на орошение (Сц3) приводит к понижению уровня грунтовых вод в летний период и незначительное их пополнение в зимний. В результате увеличивается риск истощения подземных вод и деградация их качества из-за перетока в них солей из зоны аэрации и бокового притока из межконусных понижений. Управление питанием подземных вод в сценарии 4 способствует сохранению запасов и качества грунтовых вод, поскольку при этом в подземных емкостях накапливается 100 млн. м<sup>3</sup> пресных вод. Запасы подземных вод срабатываются в летний период в результате их интенсивного отбора и пополняются в зимний путем управления их питанием. Этот подход направлен на поддержание объема и качества подземных вод в долгосрочной перспективе (см. рис. 11 и 12).

Эффект экономии воды от реализации альтернативных стратегий, выраженный в сокращении непродуктивного истощения, представлен в табл. 5. Данные табл. 5 указывают на зависимость между долей возврата, отношением между отбором подземных вод, их питанием и свободными емкостями. Рост доли возврата с 0,22 до 1,22 способствует увеличению свободной емкости от 90 до 173 млн. м<sup>3</sup> (см. табл. 1 и 5).

Водные ресурсы, накопленные в подземных емкостях в сценарии 4, использовались следующим образом: 14 % воды подано на орошение в летний период, 15 % расходовалось на транспирацию с зеркала высоко-залегающих грунтовых вод, 21 % на возвратный сток в реку в летний период и 38 % остались в водоносном пласте, будучи доступны для использования. Непроизводительные затраты воды составили 5 % на испарение и 14 % - на возвратный сток в реку в зимний период. Кроме того, уменьшение запасов подземных вод в сценарии 4 указывает на необходимость их дополнительного питания. Эффективность возврата магазинированных вод оценена в 0,79.

Результаты моделирования показали различия в реализации альтернативных стратегий управления подземными

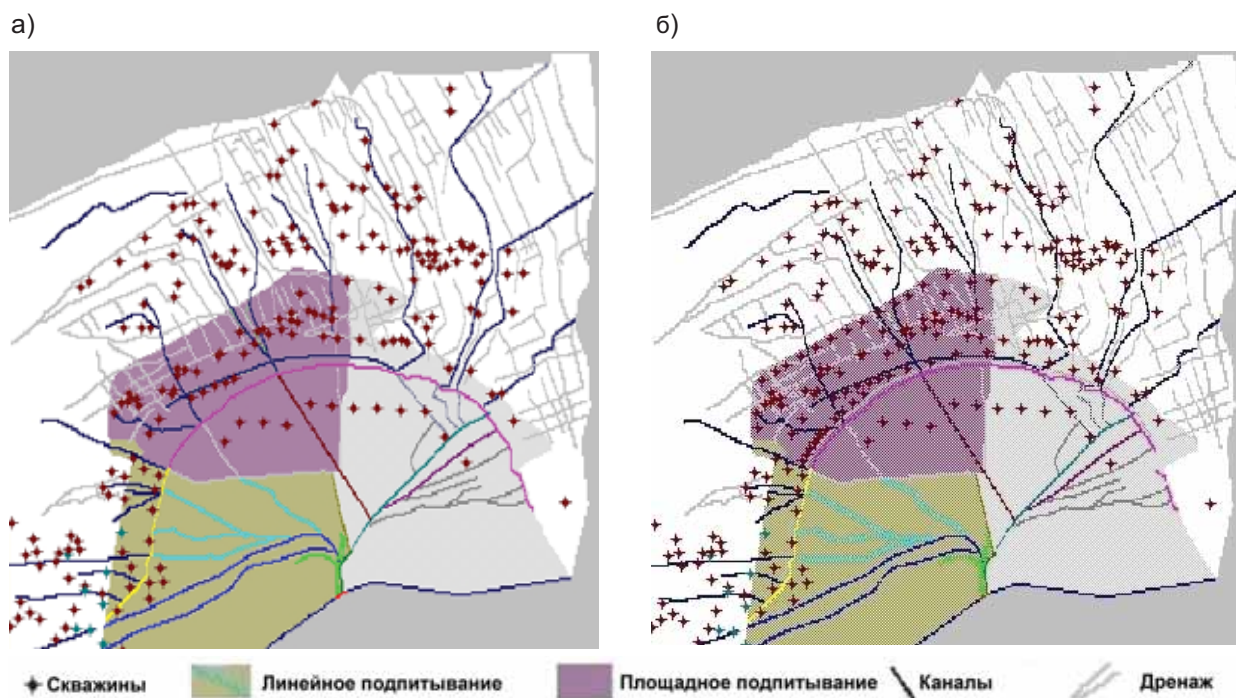


Рис. 9. Расположение скважин в бассейне р. Исфары в сценарии 2 (а) и сценариях 3 и 4 (б).

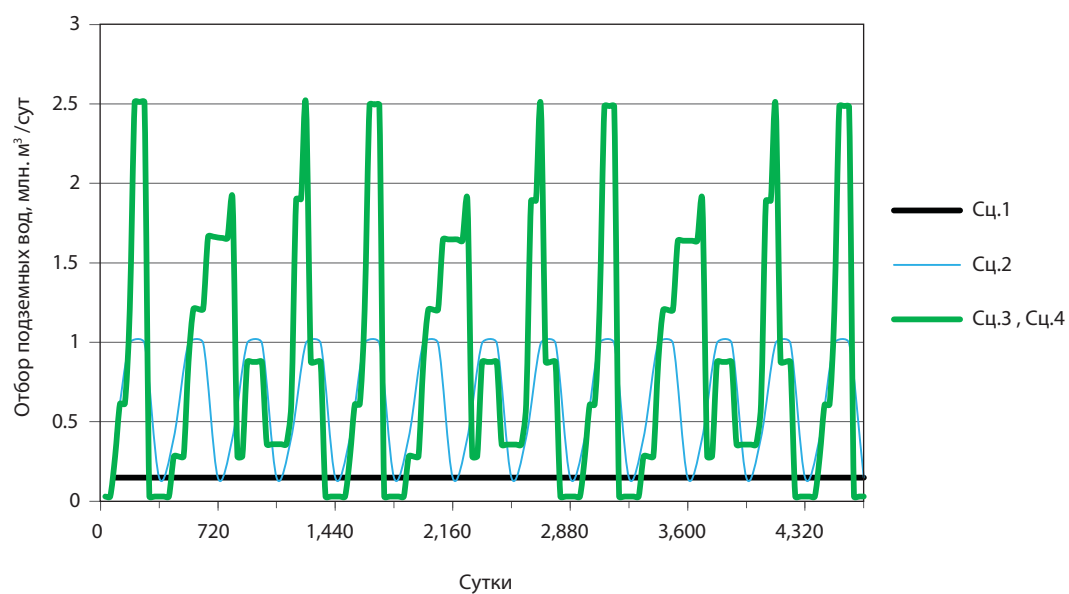


Рис. 10. Режим отбора подземных вод при различных сценариях управления подземными водами.

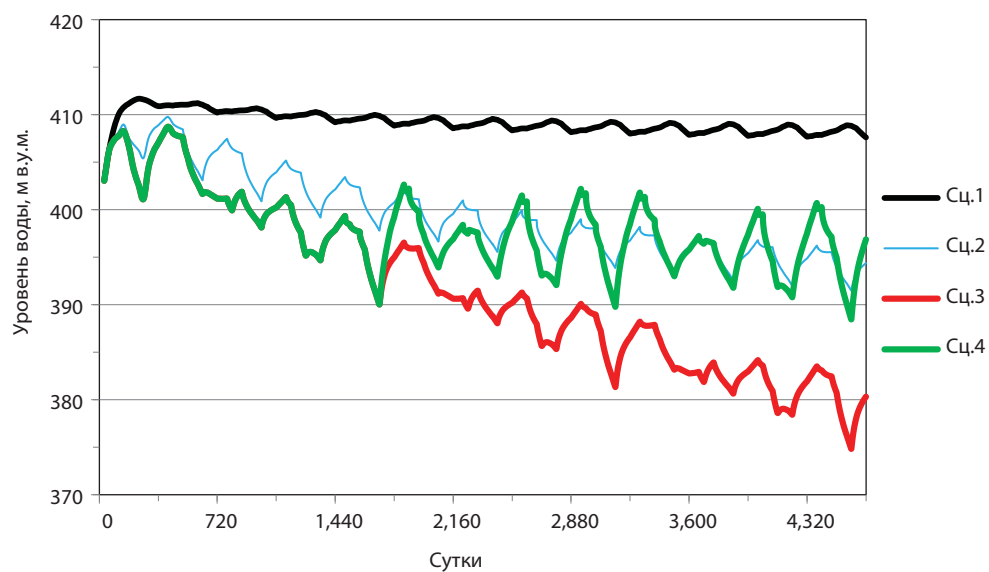


Рис. 11. Уровни подземных вод в верхнем течении р. Исфары при различных сценариях управления питанием подземных вод.

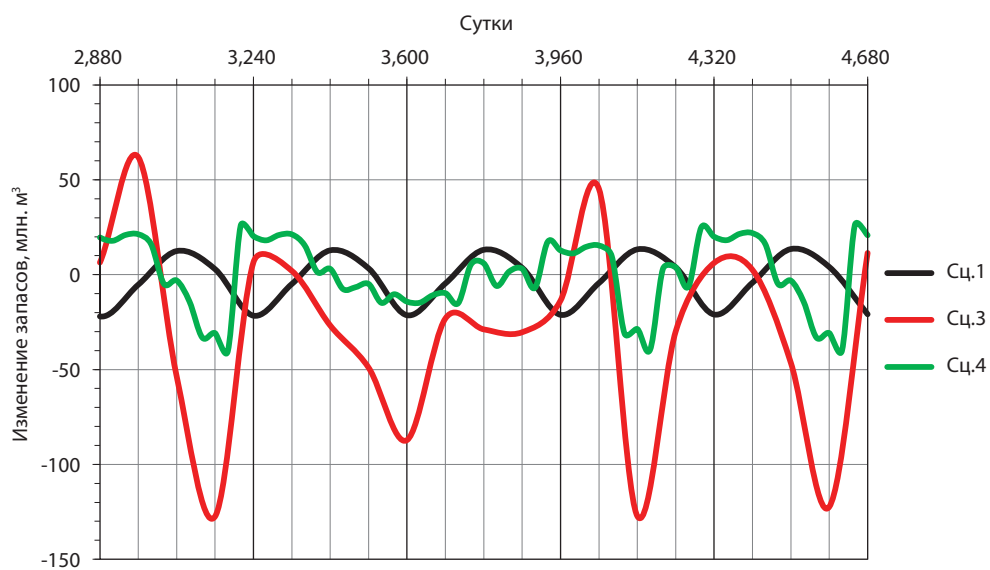


Рис. 12. Режим сбросов и наполнения подземных емкостей при альтернативных сценариях управления питанием подземных вод.

Таблица 5

Изменение запасов подземных вод Исфаринского месторождения при различных сценариях их восполнения и отбора, млн. м<sup>3</sup>/год

| Статья бюджета                          | Сц1                 | Сц2  | Сц3  | Сц4  |
|-----------------------------------------|---------------------|------|------|------|
|                                         | м <sup>3</sup> /год |      |      |      |
| Питание                                 | 182                 | 182  | 191  | 291  |
| Потери из БФК                           | 33                  | 39   | 50   | 38   |
| Отбор подземных вод                     | 53                  | 228  | 295  | 309  |
| Возвратный сток                         | 130                 | 37   | 37   | 58   |
| Эвапотранспирация                       | 60                  | 41   | 20   | 35   |
| Непроизводительные затраты <sup>а</sup> | 76                  | 30   | 33   | 51   |
| Включая испарение                       | 18                  | 12   | 6    | 11   |
| возвратный зимний сток                  | 58                  | 17   | 27   | 41   |
| Доля возврата                           | 0,25                | 1,03 | 1,22 | 0,94 |
| Изменение запасов                       |                     | -58  | -83  | -45  |
| Свободные емкости                       | 90                  | 148  | 173  | 135  |
| Эффективность magazинирования           |                     |      |      | 0,79 |

Примечание: <sup>а</sup>непроизводительные затраты включают часть эвапотранспирации с зеркала грунтовых вод на физическое испарение и отвод в водоприемники. Отвод в водоприемники в данном случае представляет собой возвратный сток в реку в зимний период, когда расположенные в нижнем течении водохранилища заполнены и не имеют свободных емкостей.

водами. Первая стратегия сохранения минимальных объемов использования грунтовых вод приведет к расширению территорий с высоким уровнем их залегания в нижнем течении бассейна р. Исфары. Следовательно, это также вызовет дальнейшее увеличение площади земель, подверженных заболачиванию и засолению. Кроме того, эта стратегия ведет к большим непроизводительным затратам водных ресурсов, включая испарение и отвод в водоприемники соленых вод. Вторая стратегия сезонного регулирования подземных вод приведет к сокращению непроизводительных затрат на испарение, отвода в приемники соленых вод и загрязнение. Однако региональные выгоды от реализации данной стратегии будут недостаточными. Нерегулируемый отбор подземных вод (Сц3) может привести к ухудшению качества воды и понижению уровня грунтовых вод, особенно в верхней части бассейна, где они имеют высокое качество. Наконец, стратегия УППВ может

способствовать предотвращению истощения подземных вод за счет накопления до 100 млн. м<sup>3</sup>/год зимнего стока р. Нарын. Эта стратегия нацелена на создание региональных выгод путем уменьшения зимнего возвратного стока на 17 млн. м<sup>3</sup>/год и накопления 100 млн. м<sup>3</sup>/год зимнего стока р. Нарын в подземных емкостях бассейна р. Исфары.

Реализация альтернативных стратегий в широком масштабе требует разных подходов. У фермеров, выращивающих хлопок и пшеницу по госзаказам государства и получающих субсидированные ресурсы, включая воду, нет стимула для водосбережения. И, наоборот, фермеры, выращивающие коммерческие культуры (фрукты, виноград, овощи) в верхней части системы, более склонны получить доступ к грунтовой воде. Однако строительство скважин может потребовать от них существенных вложений. Применение низкокачественных насосов, имеющих на местном рынке, является рискованным мероприятием и может привести к значительным потерям для фермеров, которые

хотят перейти на орошение подземными водами для выращивания многолетних культур, особенно во время начальной стадии их развития. Поэтому при первой стратегии риск убытков для небольших фермерских хозяйств, расположенных в зоне дефицита водных ресурсов и пытающихся получить доступ к грунтовой воде, высокий.

Вторая стратегия может быть стимулирована путем выделения льготных кредитов фермерам для установки скважин и покрытия эксплуатационных расходов в течение начального периода становления садов и виноградников, когда у фермеров нет свободных финансовых ресурсов, чтобы вложить капитал для установки скважин. Выгода этой стратегии заключается в снижении риска потерь для небольших фермерских хозяйств, переходящих к орошению подземными водами и расширяющих площади под ценные коммерческие культуры. Интенсивный отбор подземных вод в верхней зоне может со временем вызвать такие отрицательные процессы, как ухудшение качества воды в верхнем течении и на окружающей территории из-за перетока солей из зоны аэрации, а также понижение уровня грунтовых вод, что приведет к экономической неоправданности их отбора. Так как использование подземных и поверхностных вод регулируется одним водным законодательством в странах Центральной Азии и необходимо получить специальное разрешение на использование подземных вод, эта процедура создает предпосылки для предупреждения истощения подземных вод.

Третья стратегия нацелена на долгосрочное регулирование подземных вод путем накопления излишков стока рек в водоносных слоях в зимний период и использования их в летний на орошение. Результаты моделирования указывают на получение выгод в региональном масштабе при реализации этой стратегии. Переход от орошения поверхностными водами к совместному использованию будет способствовать увеличению летнего стока р. Нарын в нижнем течении. Глубокое залегание уровня грунтовых вод в летний период вследствие их отбора будет способствовать уменьшению площадей, подверженных заболачиванию и засолению, и увеличению площадей для выращивания коммерческих культур. Увеличение питания подземных вод в зимний период с использованием излишков пресных вод будет способствовать сохранению хорошего качества подземных вод и сокращению возвратного стока в зимний период.

Увеличение объемов отбора подземных вод на орошение может способствовать росту потребления электроэнергии в Ферганской долине. Однако земли машинного орошения, занимающие довольно обширные площади, расходуют еще больше энергии. Переход на совместное использование позволит уменьшить площади машинного орошения и, следовательно, снизить потребление электричества. Кроме того, небольшие электростанции, которые предлагается установить в русле каналов, могут производить электроэнергию, которая может быть использована для откачки воды из скважин в летний период и нужд сельского населения в зимний.

## Пример УППВ: бассейн р. Сох

### Описание участка

Бассейн р. Сох простирается более чем на 183,7 тыс. га от северных предгорий системы Туркестан-Алайской горной системы до р. Сырдарьи. Южная часть бассейна представлена поясом возвышенностей, протянувшихся в широтном направлении с абсолютными высотами 800-950 м над уровнем моря. Река Сох пересекает возвышения с юга на север узкой глубокой долиной. На севере от холмов простирается конус выноса, сформированный рекой, покрывающий основную часть исследуемой территории. В ее северной части периферия конуса выноса сливается с аллювиальной долиной р. Сырдарьи на высоте 354-362 м над уровнем моря (Гейнц, 1967).

Река Сох питается талой водой ледников и имеет максимальный сток летом и минимальный в феврале, когда подземный приток подземных вод к реке составляет почти 100%. Головной ствол реки по всей ширине аллювиального конуса выноса представляет естественную зону питания подземных вод, составляя 44,5 % от среднегодового питания грунтовых вод. Река Сох служит источником воды на орошение в верхней части бассейна, где почвенный покров представлен гравийно-песчаными отложениями, а также является основным источником питания подземных вод. Сток реки подается в оросительные каналы на головном сооружении Сарыкурган, построенном на реке сразу за возвышениями.

Водоносные отложения, подстилающие бассейн р. Сох (рис. 13, а), состоят в основном, из рыхлых, намытых гравийно-галечниковых образований. В нижних участках бассейна реки простирается линия родников шириной 3-5 км, которая идет параллельно и несколько вверх по склону от БФК (рис. 13, а, б). Грунтовая вода поступает в дренажную сеть на полосе шириной 5 км, которая находится севернее линии БФК. Направление потока в зоне разгрузки почти

вертикальное в узкой зоне родников из-за непроницаемой антиклинали, которая почти пересекает поверхность (рис. 13, б) и вызывает образование прудов, вода из которых затем испаряется или поступает в дренажную сеть.

Водоносные пласты состоят из отложений верхнечетвертичного ( $Q_{III}$ ), среднечетвертичного ( $Q_{II}$ ) и нижнечетвертичного периода ( $Q_I$ ), содержащие гравий и гальку с прослойками супесей и суглинков. Гравийно-галечниковые отложения преобладают в южной части исследуемой территории с увеличением содержания супесчаных и суглинистых почв в северных частях. Среднечетвертичные отложения ( $Q_{II}$ ) подразделяются на слои ( $Q_{II-1}$ ) и ( $Q_{II-2}$ ), с соответственно низкой и высокой гидравлической проводимостью.

Глубина уровня подземных вод изменяется с 72 до 116 м в головной части системы и может достигать всего от 0,5 до 2,5 м в зоне разгрузки. С 70-х годов в зоне исследований эксплуатировалось более 800 скважин, они использовались в основном для подачи оросительной воды в пик спроса на воду в летний период с 1980 до 1990 г. Водоносный слой в нижней части бассейна является частично напорным или субнапорным из-за перемежающихся слоев глины и суглинка (рис. 13, б) (Мирюсупов, Грачева, 2006).

### Натурные исследования естественного питания

#### Методы и данные

Полевые исследования в бассейне р. Сох были сосредоточены на оценке величины фильтрации из русла реки и поиска путей увеличения объема фильтрации. Пойма реки, состоящая из гравия, площадью в 600 га в верхней части конуса выноса создает благоприятные условия для пополнения подземных вод (рис. 14).

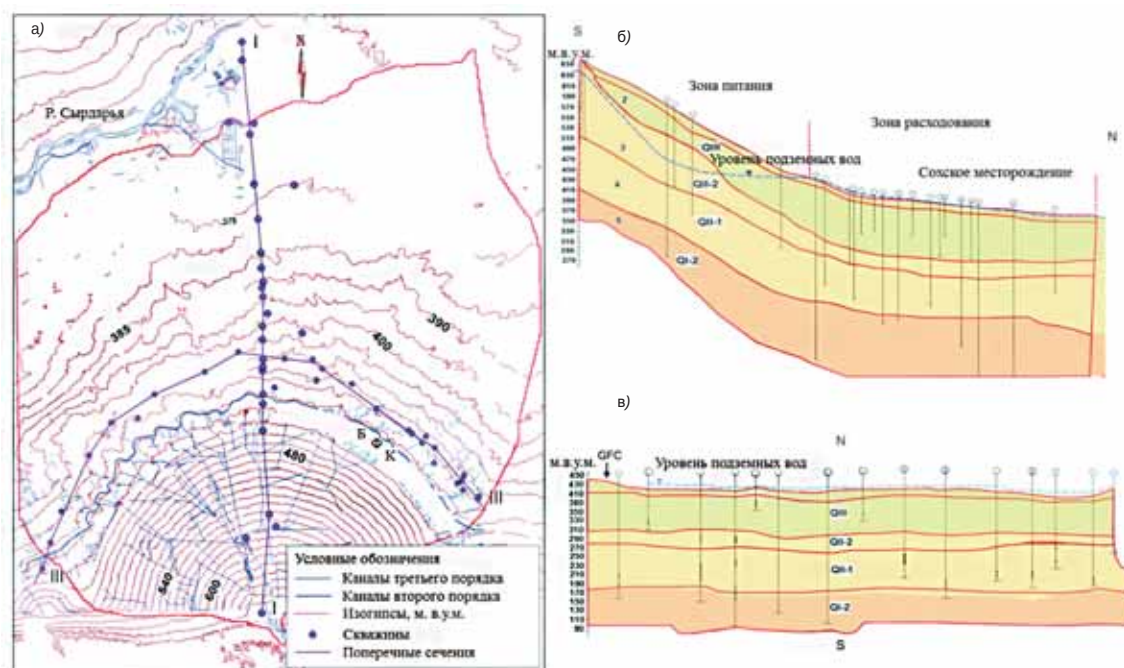


Рис. 13. Конус выноса р. Сох, план (а), продольный профиль вдоль конуса выноса (б) и поперечный профиль вдоль конуса выноса (в), (Грачева и др. 2009)

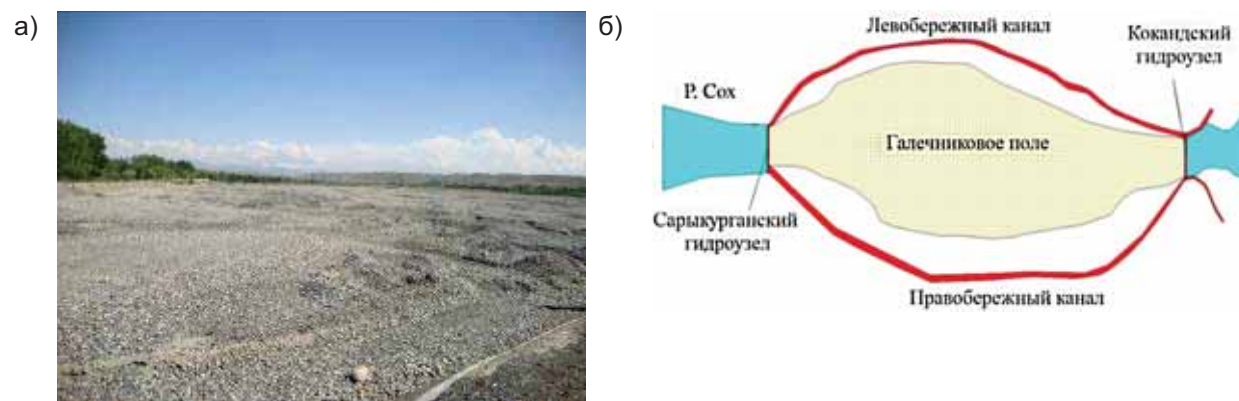


Рис. 14. Гравийное поле в верхней части бассейна р. Сох (май 2010 г., а) и схема магистральных оросительных каналов (б).

Полевые исследования состояли из двух частей: по определению статей водного баланса с июня по октябрь 2010 г. (рис. 14) и анализ долгосрочных данных стока реки и качества воды. Исследования по балансу включали измерение речного стока на головном гидроузле Сарыкурган, объем водоподачи в левобережные и правобережные каналы, речной сток в нижнем бьефе головного сооружения и поступление воды в каналы второго порядка. Измерения проводились три раза в сутки. Подъем уровня грунтовых вод замерялся один раз в трое суток при помощи наблюдательных скважин, расположенных вдоль русла реки. Образцы воды на химический анализ отбирались один раз в месяц. Анализы проводились в лабораторных условиях с использованием стандартных методов, применяемых в регионе (Аринушкина, 1970). Ежегодно, в мае, организация по управлению водными ресурсами возводит дамбу длиной 600 м и высотой 3 м через реку для повышения напора воды с целью направления речного стока в правобережный канал. Глубина воды в русле реки замерялась трижды в день с

июня по сентябрь. В результате найдена корреляционная зависимость между стоком реки в головной части и фильтрацией воды со дна реки, представленной гравием. Затем эта зависимость использовалась для оценки величины фильтрации из русла реки за многолетний период по данным о расходах воды на головном сооружении Сарыкурган за период с 1995 до 2010 г., полученным из архивных материалов администрации Бассейнового Управления Ирригационных Систем рек Сырдарьи - Сох.

## Результаты и обсуждение

Значительная часть речного стока из головного сооружения Сарыкурган в нижнее течение поступает на питание подземных вод (рис. 15).

Полевые исследования, проведенные в 2010 г., выявили, что фильтрация воды из русла реки в нижнем течении в среднем равна 30-35 % от объема попусков речного стока в нижний бьеф гидроузла (рис. 16).

Фильтрация воды из гравийного русла позволяет поддерживать низкую концентрацию

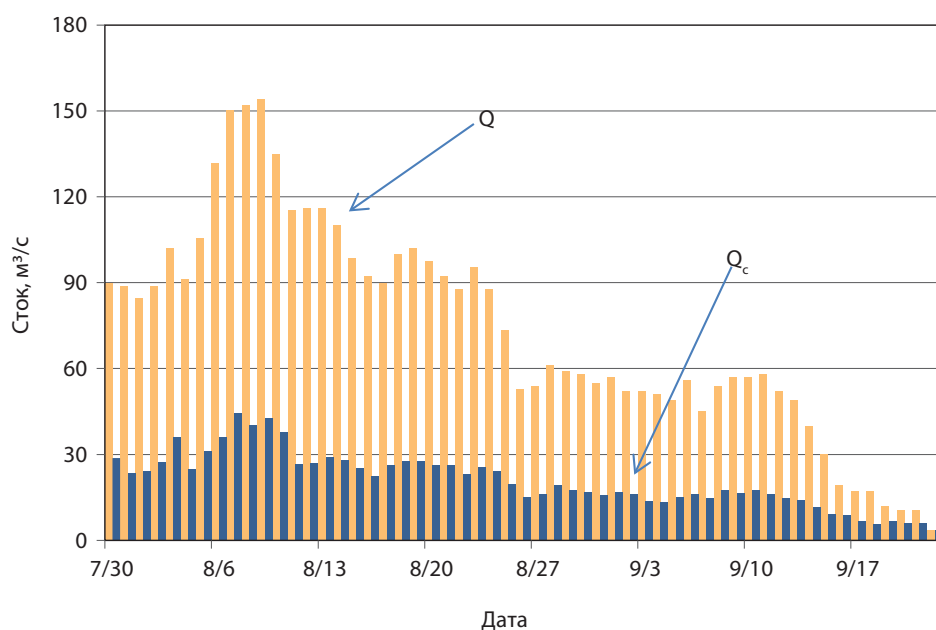


Рис. 15. Сток р. Сох в нижнем течении Сарыкурганской плотины ( $Q$ ) и фильтрация воды из поймы реки ( $Q_c$ ) (Karimov и др. 2012).

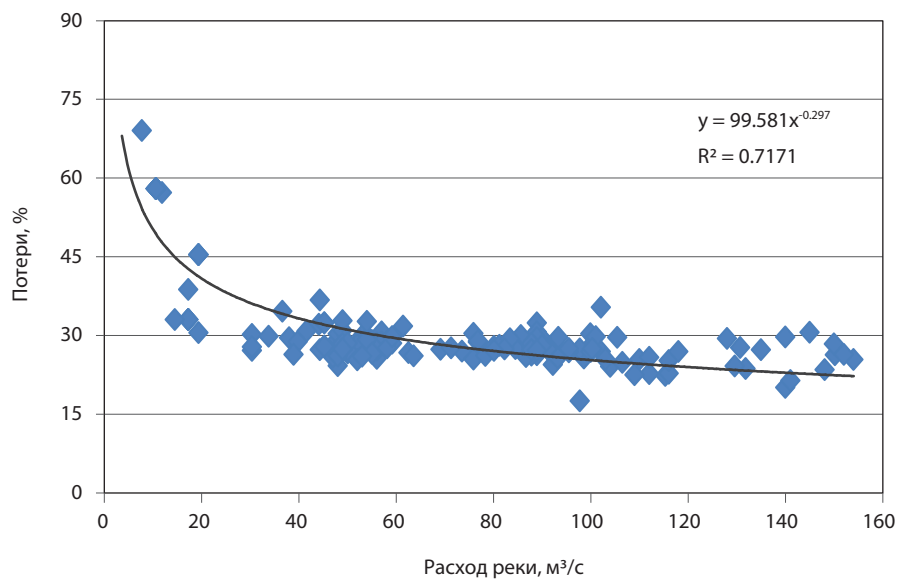


Рис. 16. Зависимость между потерями воды из гравийного русла реки и расходом стока реки в нижнем бьефе Сарыкурганской плотины (Karimov и др. 2012).

растворенных солей в подземных водах (табл. 6). Из рис. 16 видно, что относительные потери увеличиваются при малых расходах и стабилизируются на 25-35 % при расходах, превышающих 50 м³/с.

Данные, представленные в табл. 6, указывают на уменьшение концентрации растворенных солей в подземных водах во время больших потерь воды из русла реки с июля по сентябрь, после чего концентрация ионов начинает повышаться. Эти данные указывают на тренды изменения качества подземных вод в центральной части верхнего течения реки.

Концентрация растворенных ионов в подземных водах межконусных понижений намного выше. Есть два основных фактора, формирующих качество подземных вод: 1) фильтрация из русла реки в грунтовые воды способствует поддержанию хорошего качества воды; и 2) подземный приток из межконусных понижений и с верхнего течения, а также переток солей из верхних слоев почвы, повышают концентрацию ионов в подземных водах.

Полевые исследования, проведенные в 2010 г., показали, что речной сток, превышающий пропускную способность магистральных каналов, сбрасывается в нижний бьеф головного сооружения. Используя корреляционную зависимость, полученную в 2010 г., фильтрация воды из русла реки была рассчитана на период 1995-2010 гг. и представлена на рис. 17. Изменения минерализации грунтовых вод в зоне исследований за период с 1995 до 2010 гг. указывают на тесную связь между стоком реки и подземными водами. Результаты расчетов показывают (рис. 17), что потери из русла реки летом изменяются от 98 млн. м³ в течение маловодных лет до 137 млн. м³ в многоводные годы. Минерализация грунтовых вод под влиянием потерь воды из русла реки начинает снижаться весной, вплоть до осени (рис. 18). Постепенное увеличение доли минерализованных вод в балансе подземных вод указывает на необходимость принятия мер по поддержанию качества воды.

Существуют, по крайней мере, два способа поддержания качества воды: 1) внедрение

Таблица 6

Изменение качества подземных вод в верхнем течении р. Сох.

| Параметр         | Единица измерения | Головная часть |         |          | Межконусное понижение |
|------------------|-------------------|----------------|---------|----------|-----------------------|
|                  |                   | 20.07.10       | 8.09.10 | 21.10.10 | 20.08.10              |
| TDS <sup>a</sup> | мг/л              | 417±68         | 226±55  | 281±33   | 790±215               |
| HCO <sup>3</sup> | мг-экв/л          | 2.6±0.5        | 1.9±0.3 | 1.8±0.9  | 4±1.9                 |
| SO <sup>4</sup>  | мг-экв/л          | 3.9±0.9        | 1.6±0.5 | 2.4±1.3  | 8.4±3.5               |
| Cl               | мг-экв/л          | 0.6±0.2        | 0.5±0.1 | 0.5±0.1  | 0.6±0.5               |
| Ca               | мг-экв/л          | 1.4±0.2        | 0.9±0.1 | 0.7±0.3  | 3.5±1.2               |
| Mg               | мг-экв/л          | 1.9±0.3        | 1.5±0.3 | 1.7±0.5  | 4±1.2                 |
| Na               | мг-экв/л          | 3.7±0.9        | 1.7±1.1 | 2.3±0.9  | 5.5±.8                |
| pH               |                   | 8              | 8±0.2   | 7.8±0.1  | 8±0.1                 |
| TH <sup>b</sup>  | мг-экв/л          | 3.3±0.5        | 2.4±0.3 | 2.4±0.8  | 7.6±1.3               |
| CH <sup>c</sup>  | мг-экв/л          | 2.6±0.5        | 1.9±0.3 | 1.6±0.4  | 4±1.9                 |
| NCH <sup>d</sup> | мг-экв/л          | 0.8±0.3        | 0.9±0.1 | 1.3±1.1  | 4.8±1.4               |

Примечание: <sup>a</sup> минерализация; <sup>b</sup> общая жесткость; <sup>c</sup> карбонатная жесткость; <sup>d</sup> некарбонатная жесткость.

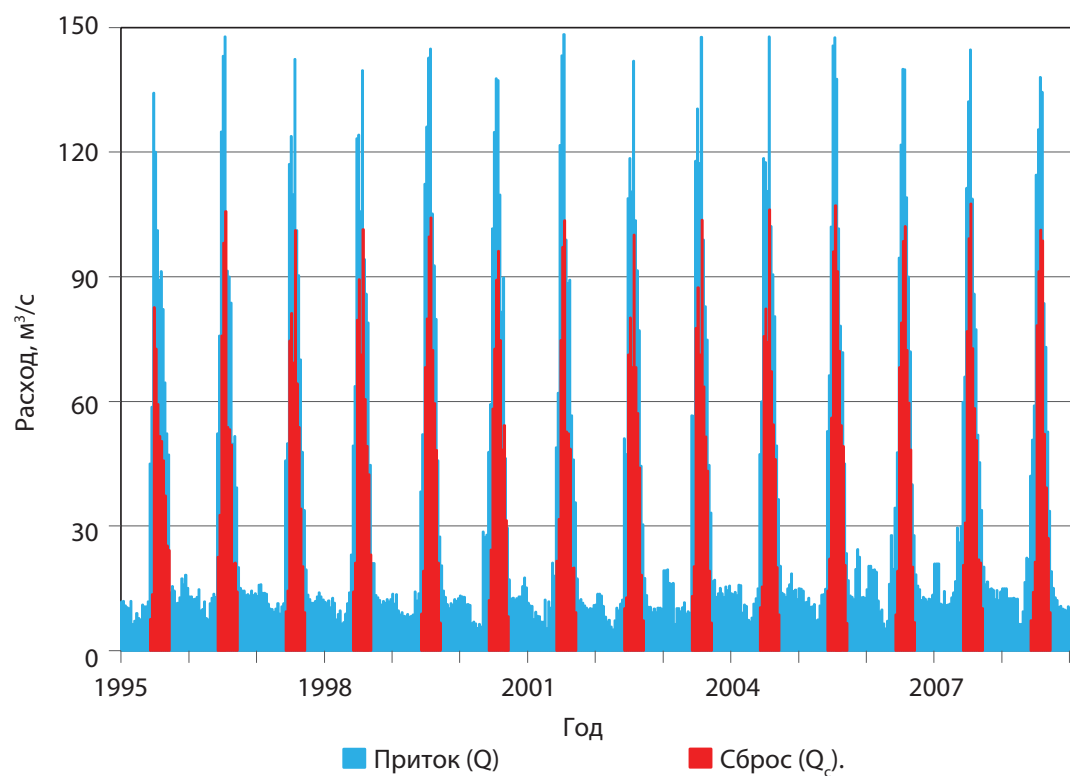


Рис. 17. Сток реки Сох (Q) на головном сооружении Сарыкурган и сброс в нижний бьеф сооружения (Qс).

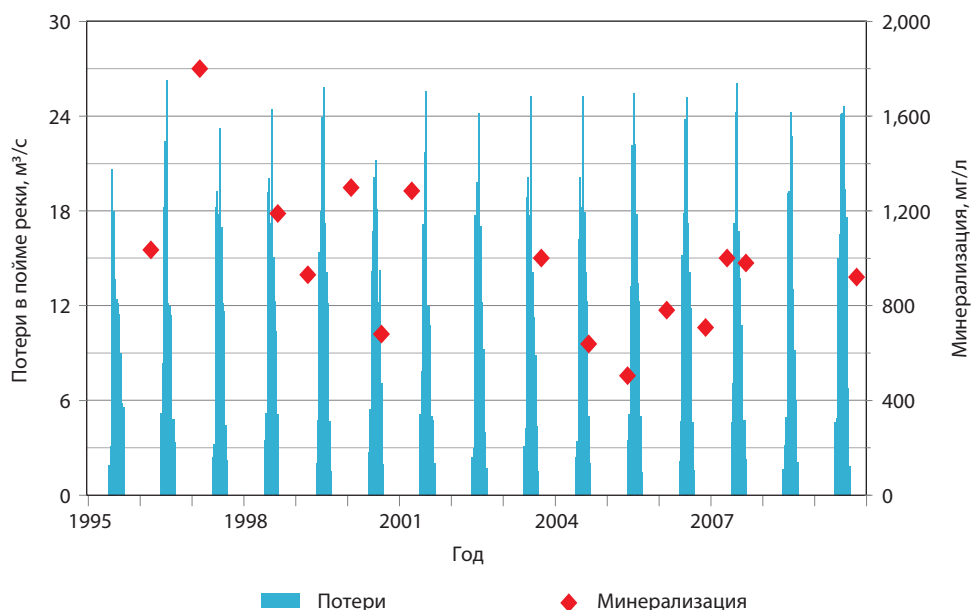


Рис. 18. Потери из поймы реки Сох и минерализация грунтовых вод (мг/л).

водосберегающих технологий для уменьшения инфильтрационных потерь с орошаемых полей и усиление фильтрации из русла реки и густой сети каналов, и 2) ограничение орошения в верхнем течении реки. Эта концепция внедрения водосберегающих технологий с целью высвобождения стока реки для увеличения питания подземных вод проверена в дальнейшем с помощью моделирования УППВ.

## Моделирование УППВ

### Описание модели

Модель подземных вод Сохского месторождения создана на базе Visual MODFLOW (v. 4.2) и широкого применения ГИС-технологий (ArcView 9.1) для подготовки исходных данных и их непосредственного ввода в модель и представления результатов моделирования. Работа выполнялась в четыре стадии: а) схематизация геологических и гидрогеологических условий; б) разработка структуры модели и сбор данных для калибровки, в) калибровка модели при

помощи многолетних данных и г) разработка и моделирование сценариев. Бумажные карты просканированы и преобразованы в полигоны для работы в среде ArcView (Rindahl 2004); цифровая модель рельефа поверхности земли создана с использованием карт масштаба 1:50000 в координатной системе Гаусса-Крюгера (1942). Сеть водотоков преобразована в растровый формат для прямого внедрения в программу MODFLOW. Главным источником были базы данных Института ГИДРОИНГЕО; они использовались для создания следующих тематических слоев: расположение и информация о наблюдательных скважинах и скважинах для откачки воды, изолинии грунтовых вод, высотные величины верхних и нижних отметок каждого геологического слоя (в электронных таблицах) и коэффициент фильтрации каждого геологического слоя. Скважины глубиной более 100 м, как правило, используются для коммунально-бытового и промышленного водоснабжения; в сравнении со скважинами на орошение и дренаж, имеющими фильтры на глубине менее 70 м, качество воды в глубоких скважинах лучше, хотя стоимость откачки выше, но не имеет такого значения, как на орошение или

дренаж. Сначала определялись граничные условия, слои и их взаимосвязи. Площадь, охваченная моделью, покрывает  $54,75 \times 50,25$  км сеткой, состоящей из 335 рядов и 365 колонок с клетками фиксированных размеров  $150 \times 150$  м. Система водоносного слоя представлена тремя геологическими единицами –  $Q_{III}$ ,  $Q_{II}$  и  $Q_I$  (рис. 13). На основе ранних гидрогеологических исследований (Мирзаев, 1974), каждой геологической единице назначили горизонтальную и вертикальную гидравлическую проводимость и толщину.

Породы трех геологических возрастов представлены в модели в виде пяти слоев, как показано на рис. 19, а. Ниже приводится описание каждого слоя:

Слой 1. Распространяется от поверхности земли до глубины 20 м. В головной части конуса выноса этот слой безводный, но на периферии уровень грунтовых вод расположен на глубине 0,5-3 м от поверхности земли.

Слой 2. Распространяется от подошвы слоя 1 к основанию стратиграфического слоя  $Q_{III}$ , располагаемого, как правило, на отметке между 280 и 350 м над уровнем моря (рис. 13, б).

Слой 3. Отметка подошвы этого слоя соответствует стратиграфической границе между геологическими единицами  $Q_{II-1}$  и  $Q_{II-2}$  и изменяется от 253 до 218 м над уровнем моря.

Слой 4. Отметка подошвы этого слоя отмечена стратиграфической границей геологических единиц  $Q_{II-2}$  и  $Q_{I-1}$  и изменяется от 218 до 125 м над уровнем моря.

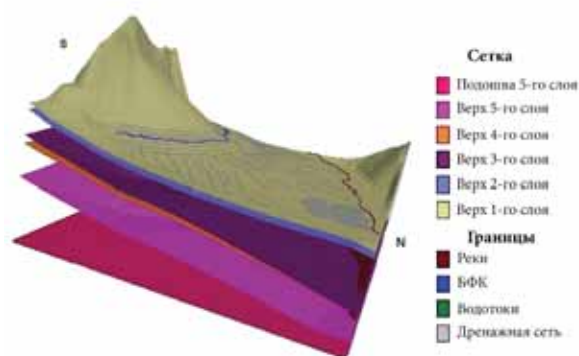
Слой 5. Отметка подошвы этого слоя принята на глубине 50 м над уровнем моря и является непроницаемой. Региональный водоупор в пределах исследуемой территории расположен очень глубоко и поэтому, нет необходимости рассматривать весь водоносный слой в данной модели. Для упрощения модели подошва 5-го слоя была принята непроницаемой, что отражает геологические условия исследуемой территории. Так же было принято во внимание, что граничное условие на глубине 300 м от

земной поверхности не окажет значительного влияния на отбор подземных вод с глубины 40-100 м от поверхности земли.

В слоях 3, 4 и 5 подземные воды напорны, с величиной упругой водоотдачи 0,0001 1/м. Модель на севере имеет граничное условие по реке, управляющее дренажным оттоком, а западные и восточные границы, проходящие по окраинам водоносного слоя, непроницаемые. Граничное условие в пределах верхнего течения является границей фиксированного подземного притока. Сток р. Сох и БФК направлен на север и запад соответственно; оба водотока включены в модель, поскольку они обеспечивают локальное питание и дренаж подземных вод. Исследуемая территория разделена на шесть зон, как показано на рис. 19, б. Зона разгрузки представлена зоной площадного выклинивания грунтовых вод (зона 3), зоной линейного выклинивания грунтовых вод (зоны 4 и 5) и зоной рассеивания (зона 6). Зона 3 представлена узкой полосой, простирающейся на 3 км на юг от БФК на 5 км на север от канала.

БФК включен в модель как граничное условие "Река". Средний расход подземных вод составляет  $1,99 \text{ м}^3/\text{с}$  севернее БФК и  $6,77 \text{ м}^3/\text{с}$  вдоль линии родников южнее БФК. Естественная фильтрация из ответвлений р. Сох включена в модель как линейное питание. Интенсивность естественного питания изменяется от 3600 до 43200 мм/год из русла водотоков в верхнем течении, но затем в транзитной зоне она снижается до 1080-18000 мм/год. На других территориях преобладает питание с орошаемых земель. Естественное питание подземных вод от осадков оценивается в 36 мм/год. Расход подземных вод в зоне их выклинивания представлен как приток в открытую дренажную глубину 3 м с постоянной высотой воды 1 м. За период исследования в общей сложности в эксплуатации находились 773 скважины, из которых 667 скважин были предназначены для орошения, 57 – для дренажа и 49 – для коммунально-бытовых нужд.

а)



б)

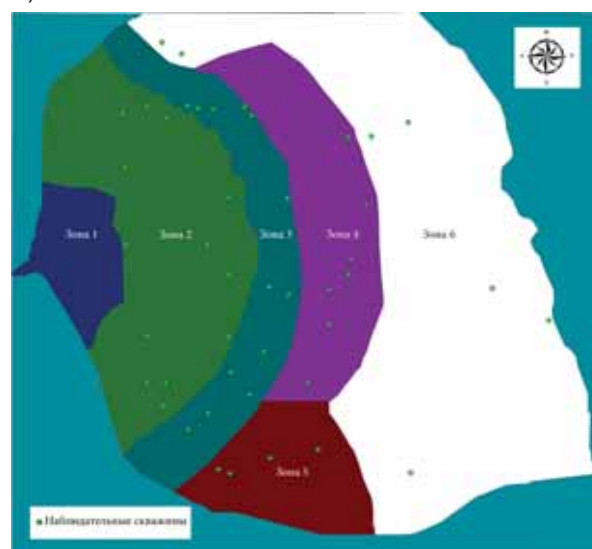


Рис. 19. Структура модели подземных вод Сохского месторождения (а) и балансовые зоны (б) (Грачева и др. 2009). Примечание: зона 1 – зона питания подземных вод. Зона 2 – транзита подземных вод. Зона 3 – площадного выклинивания подземных вод в виде родников. Зоны 4-5 – линейного выклинивания подземных вод с прямой разгрузкой в дренаж. Зона 6 – рассеивания подземных вод.

### Калибровка модели

В 1977-1978 г., Институт ГИДРОИНГЕО выполнил детальные исследования по составлению водного баланса Сохского месторождения подземных вод (Мирюсупов, Грачева, 2006). Результаты этих исследований использованы для калибровки модели. Данные по глубине уровней грунтовых вод по 44-м наблюдательным скважинам использовались для создания ГИС тематических слоев в ArcView 9.1, которые затем были интерполированы для последующего ввода в программу MODFLOW. Данные водного баланса включали все компоненты питания подземных вод – подземный приток, питание от БФК, русла реки и протоков, а также инфильтрационные потери оросительной воды и осадков. Баланс уравнивался разгрузкой грунтовых вод по обе стороны от БФК, динамикой запасов подземных вод, подземным оттоком на периферии конуса выноса в р. Сырдарью, оттоком подземных

вод в поверхностный дренаж и испарение. Отмечено, что подземный приток в два раза превышал отток.

Калибровка модели проводилась последовательным приближением гидравлических параметров каждого слоя. Подробные данные о балансе подземных вод, собранные Институтом ГИДРОИНГЕО с января 1977 по декабрь 1978, использовались для калибровки модели. Расчетные напоры на каждый месяц с января 1977 по декабрь 1978 г. сравнивались с фактическими замеренными значениями и другими параметрами, включавшими разгрузку подземных вод в дренажную сеть, приток и отток подземных вод к каждой зоне. Определенный с помощью тестовых откачек коэффициент горизонтальной фильтрации находился в пределах 4 – 12 м/сут в слое 1. Значение 4 м/сут использовалось в качестве начального. Коэффициент фильтрации в каждом слое постепенно увеличивался; были использованы только те значения, которые наиболее соответствовали

наблюдаемым и расчетным значениям уровней воды. Подобным образом рассматривали величины коэффициента вертикальной фильтрации, используя наблюдаемые и расчетные перетоки между соседними слоями как целевую функцию. Первоначально отношение величины коэффициента горизонтальной фильтрации к вертикальной было принято как 10:1 в зоне питания и 100:1 в зоне разгрузки. Достоверность параметров модели оценивалась путем сравнения наблюдаемых и расчетных значений уровня грунтовых вод, дренажного стока, потерь на испарение с зеркала грунтовых вод и потерь воды на просачивание из каналов.

Фактические и расчетные значения уровня грунтовых вод были сравнены в последовательных временных интервалах через 30, 210 и 720 дней после начала моделирования. Примеры сравнения наблюдаемых и прогнозных значений приведены на рис. 20 для трех различных зон, что указывает на допустимый уровень сходимости, но показывающих, что дальнейшее улучшение калибровки может быть получено посредством автоматической калибровки. Однако авторы предпочли использовать ручную калибровку для уточнения значений гидравлической проводимости, так как это имеет физическое значение и связано с их знанием водоносного слоя и его поведения.

Сравнение расчетных и фактических значений разгрузки подземных вод в дренажную сеть, приведенное на рис. 21, указывает на хорошую корреляцию между наблюдаемыми и расчетными данными, расхождения находились в целом в пределах 10 %. Однако расчетный объем дренажного стока оказался примерно на 22 % меньше наблюдаемого (табл. 7), и это, очевидно, произошло из-за неучета поверхностного сброса в дренажную сеть. Амплитуда питания подземных вод, как правило, составляет 35-50 м<sup>3</sup>/с, однако, колебание дренажного стока намного меньше, что указывает на высокую регулируемую способность емкостей Сохского месторождения подземных вод.

Пик питания подземных вод, регистрируемый в июле, августе, изменяется от 81-89 м<sup>3</sup>/с, но пик дренажного стока начинается в октябре и продолжается 4 месяца с расходом 20 м<sup>3</sup>/с. Расчетная величина испарения с уровня грунтовых вод составила 93,02 млн. м<sup>3</sup>/год, а измеренная 100,06 млн. м<sup>3</sup>/год, то есть расчетная величина была на 7 % меньше фактической. Расчетное значение фильтрационных потерь из русла БФК составило 82 млн. м<sup>3</sup>/год, а измеренное 97,76 млн. м<sup>3</sup>/год, разница составила 16 %. Учитывая неопределенность исходных оценок, оба эти значения были приняты как приемлемые для моделирования. Замеренный дренажный сток включает поступление в дренаж как подземных вод, так и сброс неиспользованной оросительной воды с концевой части оросительной сети. Расчетный сток дренажных вод не учитывает существенный поверхностный сброс в дренаж в зонах 5 и 6, представленных низменностями. Это может быть причиной более высокого различия между фактическими и расчетными значениями доли подземных вод в дренажном стоке.

Скорректированные значения коэффициента горизонтальной и вертикальной фильтрации даны в табл. 8.

Промежуточные слои с низкой водопроницаемостью первоначально не были включены в модель, а их влияние учитывалось посредством определения скорректированных значений коэффициента вертикальной фильтрации. Граничные условия не изменялись с 1978 г. Начиная с 1978 г., изменения элементов баланса подземных вод (отбор, питание и испарение с зеркала грунтовых вод) учтены в формулировке сценариев моделирования.

## Сценарии моделирования

Разработаны пять сценариев для поддержки альтернативных стратегий питания и использования подземных вод в бассейне р. Сох:

Сценарий 1 (Сц1) – отбор подземных вод на минимальном уровне с расходом 3.8 м<sup>3</sup>/с. Согласно этому сценарию, поверхностный сток является главным источником оросительной воды.

Сценарий 2 (Сц2) – усовершенствование бороздкового орошения путем внедрения водосберегающих технологий: применение мульчи, поливы через борозду и по коротким бороздам. Ожидается, что эти меры приведут к уменьшению питания подземных вод на орошаемых землях в верхнем течении на 20 %.

Сценарий 3 (Сц3) – внедрение передовых технологий полива в верховьях реки. Ожидается, что эти меры приведут к 40%-му сокращению питания подземных вод в верховьях реки.

Сценарий 4 (Сц4) – отбор подземных вод на максимальном уровне с расходом 22.4 м<sup>3</sup>/сек. Учитывается изменение питания подземных вод от внедрения передовых технологий полива в верховьях реки.

Сценарий 5 (Сц5) – объем отбора подземных вод такой же, как в сценарии 4, плюс увеличение питания подземных вод в зимний период из поймы р. Сох до 200 млн. м<sup>3</sup>/год и транспортировка стока р. Нарын через БФК (рис. 13, а).

## Результаты и обсуждение

Результаты моделирования уровня грунтовых вод представлены на рис. 22. Из рис. 22 видно, что следование первой стратегии без (сценарий 1) и с усовершенствованием технологии орошения (сценарии 2 и 3) ведет к высокому залеганию уровня грунтовых вод на орошаемых землях, как в верхнем, так и в нижнем течении бассейна. Кроме того, имеет место значительный возвратный сток в русло р. Сырдарьи в зимний период.

Широкое использование подземных вод на орошение, рассмотренное во второй стратегии (сценарий 4), позволит уменьшить непродуктивное испарение на 58 %, а зимний возвратный сток на 46 % (табл. 9). Однако

эта стратегия может со временем привести к количественному и качественному истощению запасов подземных вод. Режим заполнения и отбора воды из водоносного слоя представлен на рис. 23.

В сценарии 1 запасы подземных вод пополняются в летний период, а сбрасываются в зимний в результате формирования возвратного стока вод в реку. В сценарии 4 уровень подземных вод незначительно понижается в летний период, а пополняется в зимний. В сценарии УППВ (Сц5), подземные емкости заполняются в зимний период, а сбрасываются в летний. Минимальный отбор подземных вод в сценариях 1-3 приводит к высоким объемам возвратного стока в реку, оцененного в 52 % питания подземных вод, а эвапотранспирация с зеркала грунтовых вод, большая часть которой является непродуктивной, составит 39-40 % от общего питания. В соответствии с этой стратегией запасы подземных вод увеличиваются на 92 млн. м<sup>3</sup>/год и в результате увеличиваются площади с высоким залеганием уровня грунтовых вод на периферии конуса выноса, сопровождаемые заболачиванием и засолением земель.

Переход от орошения поверхностными водами к совместному использованию поверхностных и подземных вод, смоделированному в сценарии 4, уменьшит возвратный сток в реку с 52 до 27 % от общего питания подземных вод и суммарное испарение с 52 до 18 %.

В этом случае, постепенное понижение уровня грунтовых вод со временем может вызвать их истощение и повлиять на их количество и качество. Последнее может быть вызвано перетоками солей из зоны аэрации и притоком из межконусных понижений и с верхнего течения р. Сох.

Возвратный сток в реку в сценарии 5 (УППВ) оценен в 24-25 % от общего питания подземных вод, а эвапотранспирация – в 13-16 %. Магасинирование 200 млн. м<sup>3</sup>/год зимнего стока р. Сох в подземных емкостях способствует увеличению отбора подземных вод до 27 м<sup>3</sup>/с. Понижение уровня грунтовых

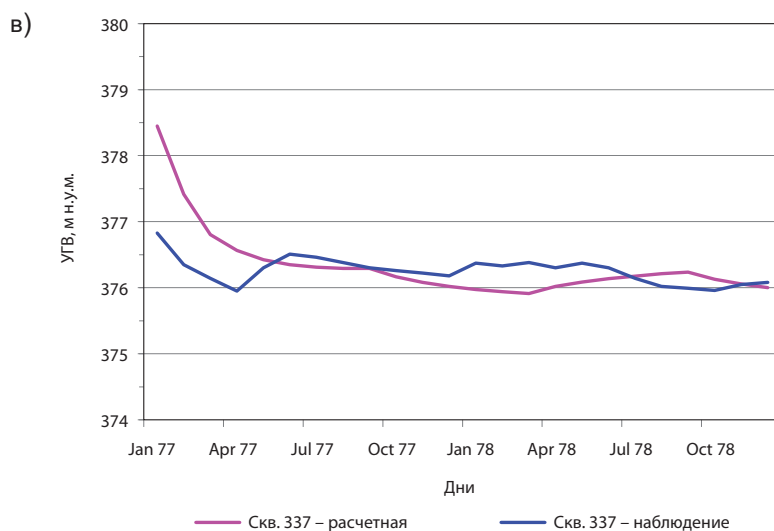
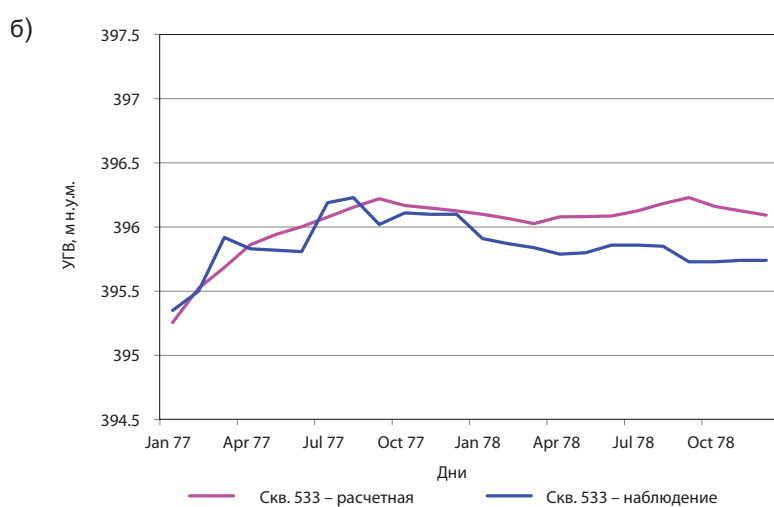
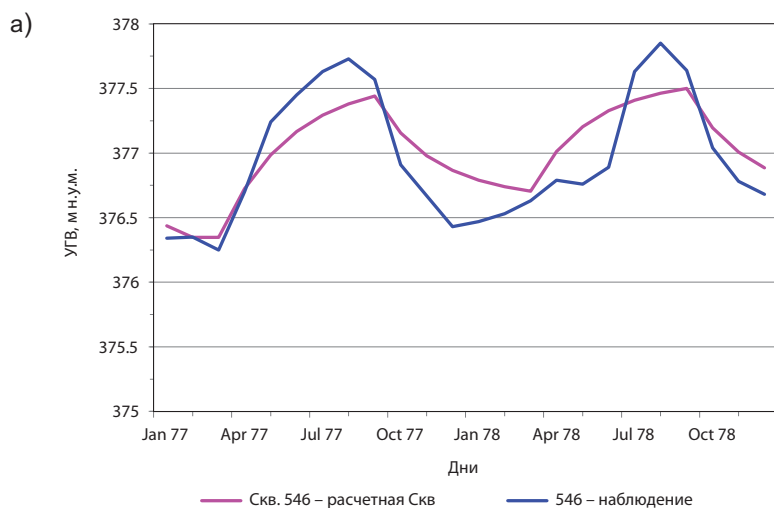


Рис. 20. Сравнение наблюдаемых и расчетных уровней подземных вод в трех различных зонах: зона 4 (а), зона 5 (б), зона 6 (в), (Грачева и др. 2009)

Таблица 7

Сравнение фактических и расчетных значений дренажного стока в бассейне р. Сох (Грачева и др. 2009).

| Зона   | Дренажный сток                         |                                         |                 |
|--------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
|        | Расчетный,<br>млн. м <sup>3</sup> /год | Измеренный,<br>млн. м <sup>3</sup> /год | Разница,<br>(%) |
| Зона 3 | 179.27                                 | 213.37                                  | 16              |
| Зона 4 | 66.7                                   | 62.63                                   | -6              |
| Зона 5 | 43.96                                  | 72.22                                   | 39              |
| Зона 6 | 50.52                                  | 64.55                                   | 22              |
| Всего  | 340.45                                 | 412.77                                  | 18              |

Таблица 8

Скорректированные значения коэффициента фильтрации, м/сут (Грачева и др. 2009)

| Слой | Зона питания (1 и 2) |          |           |          | Расходная зона (3, 4, 5 и 6) |        |           |          |
|------|----------------------|----------|-----------|----------|------------------------------|--------|-----------|----------|
|      | $kx^a_o$             | $kz^b_j$ | $kz_o$    | $kz_j$   | $kx_o$                       | $kx_j$ | $kz_o$    | $kz_j$   |
| 1    |                      |          |           |          | 4-15                         | 10     | 0.08-12.5 | 0.05-1.6 |
| 2    | 115-120              | 90-100   | 0.08-11.5 | 0.05-1.6 | 4-15                         | 10     | 0.08-12.5 | 0.05-1.6 |
| 3    | 40-65                | 35-50    | 0.047-6.5 | 0.43-0.7 | 7-10                         | 8      | 0.04-6.5  | 0.43-0.7 |
| 4    | 40-65                | 35-50    | 0.047-6.5 | 0.43-0.7 | 7-10                         | 8      | 0.04-6.5  | 0.43-0.7 |
| 5    | 15-25                | 12-20    | 0.047-6.5 | 0.43-0.7 | 2-3                          | 6      | 0.04-6.5  | 0.43-0.7 |

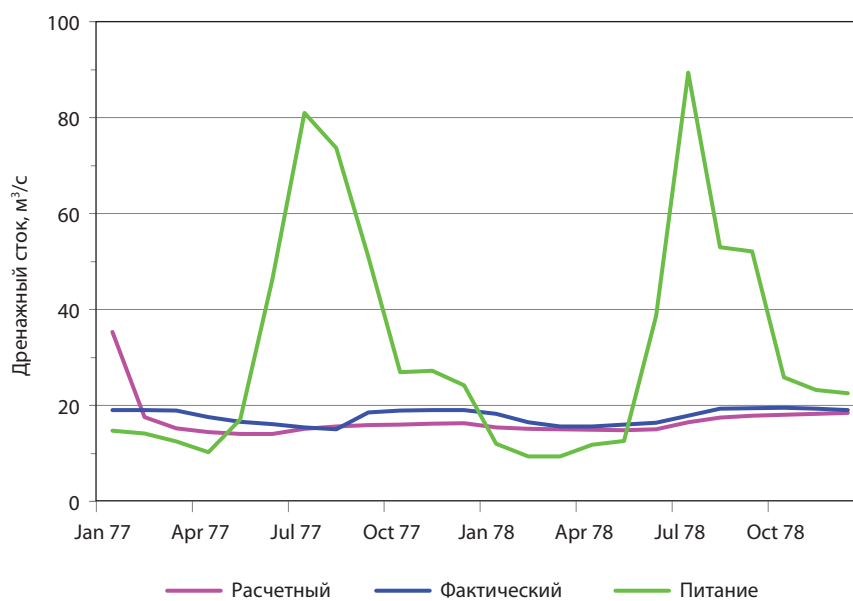
<sup>a</sup>Коэффициент горизонтальной фильтрации; <sup>b</sup>коэффициент вертикальной фильтрации

Рис. 21. Пример сравнения фактических и расчетных значений дренажного стока по дрене 'К' и питание подземных вод. (Грачева и др. 2009).

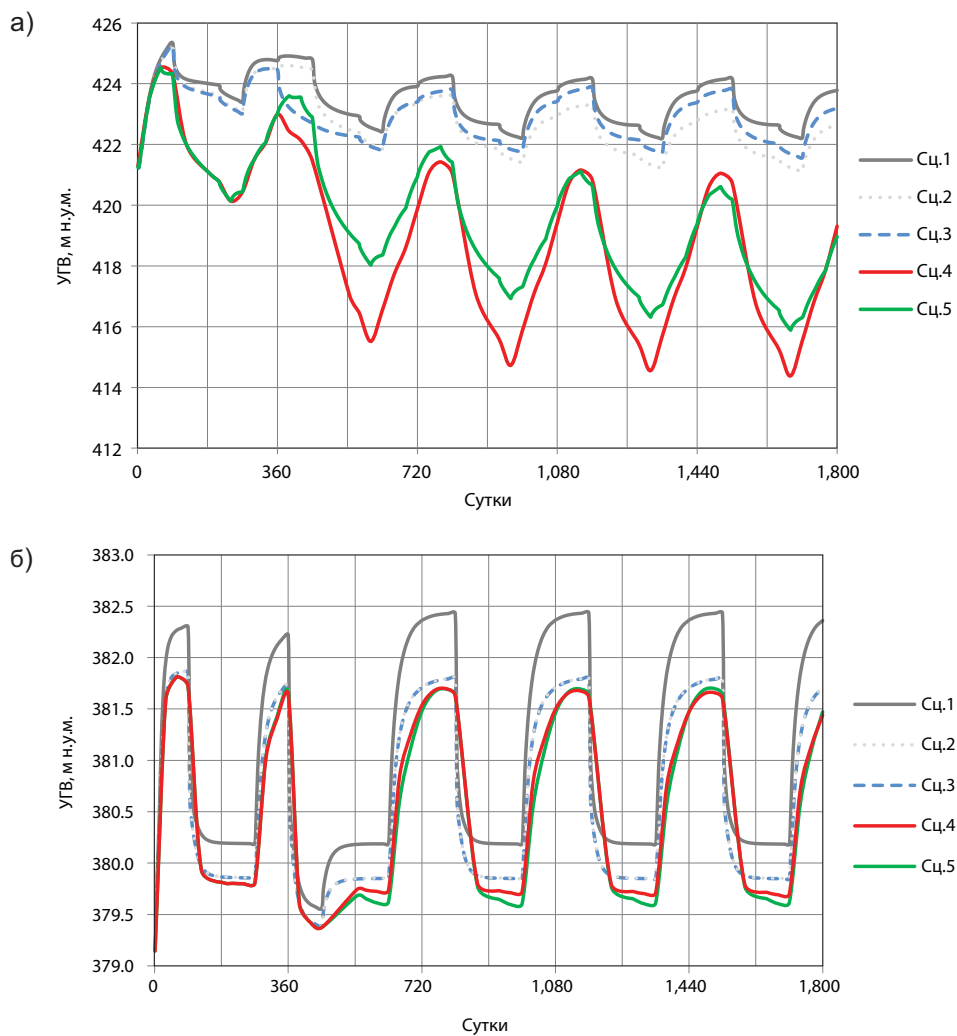


Рис. 22. Изменение уровня грунтовых вод в верхней (а) и нижней (б) частях бассейна р. Сох при различных сценариях управления питанием подземных вод

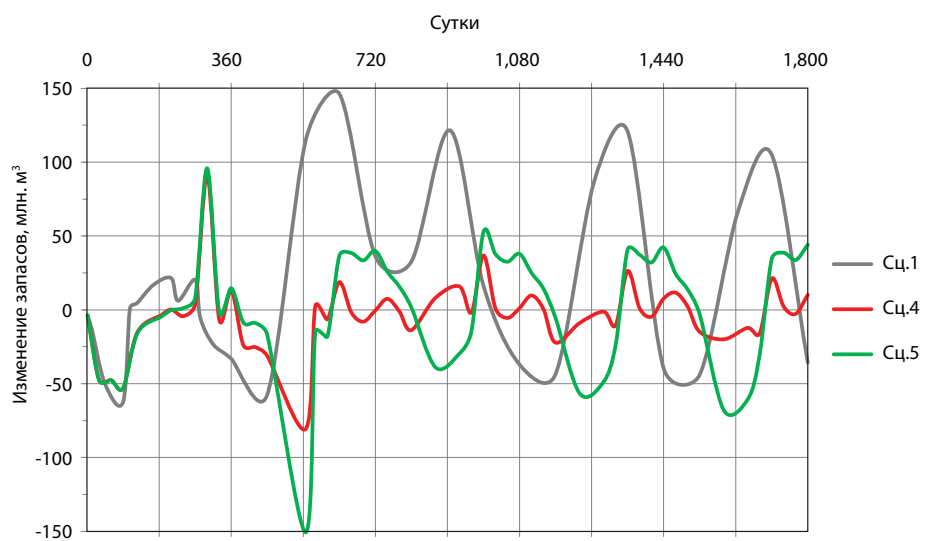


Рис. 23. Расчетный режим питания и сработки запасов подземных вод Сохского месторождения.

Таблица 9

Изменение запасов подземных вод при альтернативных стратегиях управления питанием подземных вод в бассейне р. Сох, млн. м<sup>3</sup>

|                      | Сц1   | Сц2 | Сц3 | Сц4 | Сц5   |
|----------------------|-------|-----|-----|-----|-------|
| <b>За год</b>        |       |     |     |     |       |
| Площадное питание    | 1,113 | 953 | 939 | 991 | 1,192 |
| Фильтрация с каналов | 68    | 80  | 81  | 125 | 124   |
| Отбор скважинами     | 117   | 117 | 117 | 698 | 698   |
| Возвратный сток      | 609   | 540 | 533 | 302 | 322   |
| Эвапотранспирация    | 470   | 405 | 399 | 198 | 205   |
| Изменение запасов    | 92    | 71  | 69  | -18 | 118   |
| <b>Зимний период</b> |       |     |     |     |       |
| Площадное питание    | 288   | 246 | 244 | 253 | 359   |
| Фильтрация с каналов | 23    | 31  | 32  | 51  | 50    |
| Отбор скважинами     | 0     | 0   | 0   | 107 | 107   |
| Возвратный сток      | 393   | 356 | 354 | 214 | 231   |
| Эвапотранспирация    | 48    | 41  | 41  | 36  | 37    |
| Изменение запасов    | -91   | -78 | -78 | -39 | -45   |
| <b>Летний период</b> |       |     |     |     |       |
| Площадное питание    | 825   | 707 | 694 | 738 | 832   |
| Фильтрация с каналов | 46    | 26  | 49  | 74  | 73    |
| Отбор скважинами     | 591   | 117 | 117 | 591 | 591   |
| Возвратный сток      | 92    | 185 | 179 | 89  | 92    |
| Эвапотранспирация    | 422   | 365 | 359 | 162 | 168   |
| Изменение запасов    | 121   | 100 | 99  | -21 | 45    |

вод в зоне БФК увеличит фильтрацию из канала с 81 до 125 млн. м<sup>3</sup>/год, или на 50 %. Важно отметить, что, если в сценариях 1 – 3 запасы подземных вод пополняются в летний период и срабатывались в зимний, то в сценарии 4, где отбор подземных вод не регулируется, снижение уровня происходит в летний и зимний периоды. В сценарии 5 (УППВ) запасы подземных вод намеренно срабатываются в летний период и восполняются в зимний. В сценарии УППВ возвратный сток в зимний период может быть сокращен с 393 до 231 млн. м<sup>3</sup> за сезон (табл. 10).

Результаты моделирования, представленные в табл. 10, показывают низкую эффективность управления подземными водами при реализации стратегии 1, которая увеличивается до 0,63 при реализации стратегии 4, предусматривающей управление питанием подземных вод и совместное использование поверхностных и подземных вод на орошение. Непроизводительные

затраты водных ресурсов уменьшаются с 48 % при реализации стратегии 1 до 25 % при реализации стратегии 3. Подобный потенциал внедрения УППВ имеется и в других месторождениях подземных вод Ферганской долины, что демонстрирует важность ее реализации для улучшения управления водными ресурсами в Ферганской долине и в целом в бассейне р. Сырдарьи.

## Выводы

Данные исследования отмечают растущий спрос на продовольствие и энергию, и увеличение конкуренции за воду между водопользователями верхнего и нижнего течения бассейна р. Сырдарьи. Более того, переход режима эксплуатации водохранилища в верхнем течении реки от ирригационного-энергетического на исключительно энергетический способствовал уменьшению стока реки в нижнем течении в летний период

Таблица 10

Основные показатели альтернативных стратегий управления питанием подземных вод в бассейне р. Сох (млн. м<sup>3</sup>/год).

| Показатель                                        | Сц.1 | Сц.2 | Сц.3 | Сц.4 | Сц.5 | Сц.6 |
|---------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Питание подземных вод                             | 1113 | 953  | 939  | 991  | 1192 | 1169 |
| В том числе: аккумулярование зимнего стока р. Сох |      |      |      |      | 115  | 190  |
| р. Нарын                                          |      |      |      |      | 27   | 49   |
| Отбор подземных вод                               | 117  | 117  | 117  | 698  | 698  | 843  |
| Непроизводительные потери:                        | 534  | 477  | 474  | 273  | 292  | 296  |
| испарение                                         | 141  | 122  | 120  | 59   | 62   | 54   |
| возвратный зимний сток                            | 393  | 356  | 354  | 214  | 231  | 242  |
| Изменение запасов                                 |      | -15  | -15  | -68  | 105  | 28   |
| Свободные емкости                                 | 1452 | 1467 | 1467 | 1535 | 1347 | 1424 |
| Эффективность управления питанием подземных вод   | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,63 | 0,53 | 0,63 |

и увеличению его в зимний. Совпадение пиков зимних попусков воды из водохранилища верхнего течения и возвратного стока с орошаемых территорий Ферганской долины способствует формированию чрезмерного стока реки, усложняющего эксплуатацию водохранилищ ниже по течению. В результате в летний период возникает дефицит воды в пределах 2-3 млрд. м<sup>3</sup>/год, негативно сказывающийся на водопользователях нижнего течения, а в зимний период чрезмерный, часто неиспользуемый сток той же величины. Прогнозное сокращение стока рек на ~ 6-10 % к 2050 г. из-за изменения климата с большей частотой образования чрезмерно высоких и малых стоков может еще более усложнить регулирование водных ресурсов в нижнем течении бассейна, которое в настоящее время осуществляется, в основном, каскадом водохранилищ. Результаты исследований показывают, что существующая схема последовательно расположенных русловых водохранилищ не способна удовлетворить потребности в воде как верхнего, так и нижнего течения, одновременно. УППВ в верхнем течении Ферганской долины и других частях бассейна р. Сырдарьи может содействовать адаптации к новым реалиям управления водными ресурсами. В бассейнах малых рек Ферганской долины свободные

подземные емкости составляют более 3 млрд. м<sup>3</sup>/год. Они могут быть использованы для накопления избыточного стока малых рек и сокращения возвратного стока в р. Сырдарью. Дополнительные свободные емкости для УППВ могут быть созданы в зоне командования магистральных каналов путем интенсивного отбора подземных вод. Водные ресурсы, доступные в Ферганской долине для УППВ, включают зимний сток р. Нарын от 2 до 3 млрд. м<sup>3</sup> за сезон, зимний сток малых рек объемом в 1 млрд. м<sup>3</sup>/год, который может быть высвобожден путем увеличения отбора подземных вод на орошение и внедрения водосберегающих технологий; и зимние осадки – объемом 500 млрд. м<sup>3</sup>/год. Водные ресурсы, доступные для УППВ, составляют от 13 до 17 % от общего притока в Ферганскую долину в маловодные и многоводные годы, соответственно.

В данной исследовательской работе применена пошаговая процедура внедрения УППВ в Ферганской долине. На первом шаге проводилась региональная оценка потенциала УППВ и возможности перехода от поверхностного орошения к совместному использованию поверхностных и подземных вод. На втором – применение УППВ в зоне отдельных месторождений, расположенных в концевых частях магистральных каналов.

Третьим шагом является переход к следующему месторождению подземных вод вдоль магистральных каналов. Когда этот процесс завершен для всех отдельных месторождений вдоль магистральных каналов, рассматривается УППВ для всей Ферганской долины.

Региональная оценка показала, что более 500 тыс. га или 55 % орошаемых в настоящее время земель Ферганской долины могут перейти от орошения поверхностными водами к совместному использованию поверхностных и подземных вод, что уменьшит возвратный сток в реку на 30 % или на 1 млрд. м<sup>3</sup>/год и сформирует свободные подземные емкости в объеме 500 млн. м<sup>3</sup> в зоне командования магистральных каналов. Исследования на пилотном участке и моделирование УППВ для Исфаринского месторождения подземных вод, расположенного в концевой части БФК, показали, что отбор подземных вод в летний период, превышающий среднегодовое восполнение подземных вод на 20 %, создаст свободные подземные емкости для magazинирования 100 млн. м<sup>3</sup> зимнего стока р. Нарын в подземных емкостях бассейна р. Исфары.

Исследования на пилотном участке и моделирование УППВ для Сохского месторождения подземных вод, расположенного вдоль БФК, показали, что сезонный отбор 63 % годового питания подземных вод и внедрение водосберегающих технологий в верхнем течении р. Сох высвободят зимний сток реки объемом 115 млн. м<sup>3</sup> для увеличения естественного питания подземных вод из русла реки. Увеличение отбора подземных вод уменьшит возвратный сток в р. Сырдарью в зимний период на 162 млн. м<sup>3</sup>, а в летний период водопользователи нижнего течения р. Сырдарьи получат дополнительно 100 млн. м<sup>3</sup>/год стока р. Нарын. В целом, широкое внедрение указанных мероприятий, основанных на использовании подземных вод на орошение и УППВ в Ферганской долине, может уменьшить зимний сток р. Сырдарьи при выходе из Ферганской

долины на 1,5 млрд. м<sup>3</sup>/год и, следовательно, увеличить летний сток реки на ту же величину.

Результаты исследования показывают, что для УППВ в Ферганской долине могут быть использованы простые сооружения (инфильтрационные бассейны) и увеличение естественного пополнения подземных вод из русел рек. Малые инфильтрационные бассейны могут быть построены вдоль магистральных каналов, которые доставляют воду р. Нарын в маловодные районы Ферганской долины. Усиление естественного питания подземных вод из поймы малых рек является эффективным средством восполнения запасов подземных вод и сохранения их качества. Для научно-обоснованного внедрения УППВ в масштабе бассейна р. Сырдарьи в целом необходимо провести следующие исследования:

- оценить потенциал УППВ в пределах всего бассейна р. Сырдарьи, включая предгорья Северного Таджикистана и низменности Южного Казахстана;
- оценить потенциал внедрения усовершенствованных технологий УППВ (подземные плотины и технологии отбора подземных вод);
- исследовать управление качеством подземных вод путем УППВ;
- адаптировать водосберегающие технологии (капельное орошение) к УППВ.

Результаты данного исследования указывают на необходимость (особенно для проектов, действующих в настоящее время в регионе) перевода фокуса от реконструкции густой сети дренажа в Ферганской долине к использованию подземных вод на орошение и УППВ. «Мелиоративный фонд», созданный при правительстве Республики Узбекистан для мелиорации засоленных и низко-продуктивных земель, так же может быть использован в качестве финансового инструмента для реализации УППВ.

## Литература

- Abdullaev, U.; Khasankhanova, G.; Myagkov, S.; Khamzina, T.; Agalceva, N.; Fazilova, M.; Lysenko, O.; Merkushev, A.; Abdullaev, Sh.; Voronov, A.; Manuyk, N.; Nechaeva, G. 2007. Water - critical resource for Uzbekistan's future. Tashkent, Uzbekistan: United Nations Development Programme (UNDP). 24p.
- Агальцева Н.А., Пак А.В. Влияние изменения климата на сток рек бассейна Аральского моря. Бюллетень: Климатические сценарии, влияние изменения климата. Ташкент; Научно-исследовательский институт гидрометеорологии. стр. 44-52. 2007 г.
- Акрамов А.А. Регулирование запасов пресных вод в подземных водохранилищах Средней Азии. Ташкент; Фан. 207 стр. 1991 г.
- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. МГУ. 1970 г.
- Central Ground Water Board. 2005. Master plan for artificial recharge to ground water in India. 117p. India: Central Ground Water Board. Available at <http://cgwb.gov.in/documents/MASTER%20PLAN%20Final-2002.pdf> (ссылка проверена 22.06.2013).
- Charlesworth, P.B.; Narayan, K.A.; Bristow, K.L.; Lowis, B.; Laidlow, G.; McGowan, R. 2002. The Burdekin delta – Australia's oldest artificial recharge scheme. In: Management of aquifer recharge for sustainability, Dillon, P.J., ed., Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge (ISAR4), Adelaide, September 22-26, 2002, Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 527 4, pp. 347-352.
- Dillon, P. 2005. Future management of aquifer recharge. *Hydrogeol. J.* 13: 313-316.
- Dillon, P. 2011. Managed aquifer recharge - example of success. National Research Flagships. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). Доступно на сайте <http://www.bebuffered.com/downloads/> (ссылка проверена 17.02.2013).
- Духовный В.А., Умаров П.Д., Якубов Х.Э., Тучин А.И. Дренаж в бассейне Аральского моря – на пути к стратегии устойчивого орошаемого сельского хозяйства. Отчет международной конференции «На пути к стратегии по устойчивому ведению орошаемого сельского хозяйства и возможности инвестиций в дренаж в бассейне Аральского моря. 10-13 марта, 2004. Ташкент, Узбекистан. Стр. 134–162. 2005 г.
- EPA (Environmental Protection Authority). 2009. Guidelines for Managed Aquifer Recharge (MAR) – Health and environmental risk management. EPA Victoria Publication 1290, July 2009. Документ доступен по ссылке <http://epanote2.epa.vic.gov.au/EPA/publications.nsf/PubDocsLU/1290?OpenDocument> (ссылка проверена 17.02.2013).
- Гейнц В. А. Подземные воды четвертичных отложений Юго-Западной Ферганы, их режим и баланс в соответствии с водохозяйственной деятельностью. Ташкент; Фан. 98 стр. 1967 г.
- GHD Pty Ltd. and AGT Pty Ltd. 2011. Feasibility of managed aquifer recharge for agriculture. Waterlines Report. Canberra, Australia: National Water Commission.
- Gracheva, I.; Karimov, A.; Tural, H.; Miryusupov, F. 2009. Assessment of the potential and impacts of winter water banking in the Sokh aquifer, Central Asia. *Hydrogeol. J.* 17(6): 1471-1482.
- Harbaugh, A.W.; McDonald, M.G. 1996. User's Documentation for MODFLOW-96, an update to the US Geological Survey modular finite difference ground-water flow model. Open-File Report 96-485, USGS: Reston; 56 pp.
- Ishida, S.; Tsuchihara, T.; Yoshimoto, S.; Imaizumi, M. 2011. Sustainable use of groundwater with underground dams. *JARQ* 45(1): 51-61. <http://www.jircas.affrc.go.jp>
- Jia, Y.; Yu, J. 2010. Sustainable groundwater management in the North China Plain: main issues, practices and foresights. In: the Proceedings of XXXVIII IAH Congress. Groundwater Quality Sustainability. Krakow, 12 Quality Sustainab. Extended abstracts. P.855-861.
- Jinxia, W.; Huang, J.; Rozelle, S.; Huang, Q.; Blanke, A. 2007. Agriculture and groundwater development in northern China: trends, institutional responses, and policy options. *Water Policy* 9 (Supplement 1): 61-74.

- Karimov A.; Mavlonov A.; Miryusupov, P.; Gracheva, I.; Abdurahmonov, B. 2012. Modelling policy alternatives toward managed aquifer recharge in the Fergana Valley, Central Asia. *Water international*, iFirst, 2012, 1–15.
- Karimov, A.; Smakhtin, V.; Mavlonov, A.; Gracheva, I. 2010. Water 'banking' in Fergana valley aquifers—A solution to water allocation in the Syrdarya river basin? *Agricultural Water Management* 97 (2010) 1,461–1,468
- Хасанханова Г., Хамзина Т., Ибрагимов Р. Потребность культур в воде в Ферганской долине. Статья, представленная на региональной конференции по совместному использованию подземных и поверхностных водных ресурсов на орошение в Ферганской долине. Ташкент, Узбекистан, 2 ноября, 2006 г.
- Kumar, S.A.; Rajput, T.B.S. 2005. Optimizing water uses and recharging of aquifers. *Indian farming*. New Delhi: Indian Agricultural Research Institute.
- Ланге О. К. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия Узбекистана. Том 2. Ташкент. Издательство Фан, 319 стр. 1964 г.
- Lluria, M.R. 2009. Successful application of Managed Aquifer Recharge in the improvement of the water resources management of semi-arid regions: Examples from Arizona and the Southwestern U.S.A. *Boletín Geológico y Minero* 120(2): 111-120.
- Мавлонов А. А, Борисов В. А, Джуманов Ж. Х. Оценка ресурсов подземных вод в Ферганской долине. Статья, представленная на региональной конференции по совместному использованию подземных и поверхностных водных ресурсов на орошение в Ферганской долине. 2 ноября, 2006 г. Ташкент, Узбекистан. 2006 г.
- Ministry of Land Resources of China. 2005. Report on groundwater resources and environment investigation in China. Beijing, China: Ministry of Land Resources.
- Ministry of Water Resources of China and Nanjing Water Institute. 2004. Groundwater exploitation and utilization in the early 21st century. Beijing, China: China Water Resources and Hydropower Publishing House.
- Мирюсупов Ф., Грачева И. Схематизация гидрогеологических условий Сохского месторождения подземных вод. Статья, представленная на региональной конференции по совместному использованию подземных и поверхностных водных ресурсов на орошение в Ферганской долине. 2 ноября, 2006 г. Ташкент, Узбекистан. 2006 г.
- Мирзаев С. Ш. Методика региональной оценки потенциала искусственного восполнения подземных вод // *Узбекский геологический журнал*, № 1. Стр. 5-7. 1972 г.
- Мирзаев С. Ш. Запасы подземных вод Узбекистана. Ташкент, Фан. 1974 г.
- Мустафаев Ж., Рябцев А. Д., Балгерей М. А., Карлиханов О. К. Проблемы пропуска зимнего стока река Сырдарья ниже Чардаринского водохранилища // *Водное хозяйство Казахстана*. № 1, стр. 2-8. 2006 г.
- Parsons, S.; Dillon, P.; Irvine, E.; Holland, G.; Kaufman, C. 2012. Progress in managed aquifer recharge in Australia. *Waterlines Report Series No. 73*, March 2012. Отчет доступен по ссылке [http://www.nwc.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0015/21534/Waterlines-73-Managed-aquifer-recharge.pdf](http://www.nwc.gov.au/__data/assets/pdf_file/0015/21534/Waterlines-73-Managed-aquifer-recharge.pdf) (ссылка проверена 18.02.2013).
- Rindahl, B. 2004. Groundwater modeling and analysis using the USGS MODFLOW program and ArcView. Published Online in ESRI International User Conference 1996 Proceedings. ESRI International User Conference. Документ доступен на сайте <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc96/TO50/PAP042/P42.HTM> (ссылка проверена 18.02.2013).
- Romani, S. 2005. National blueprint for recharging groundwater resources of India. Central Groundwater Board. <http://www.publications.iwmi.org/pdf/H039309.pdf> (ссылка проверена 18.02.2013).
- Rosegrant, M.W.; Cai, X.; Cline, S.A. 2002. World water and food to 2025: Dealing with scarcity. Washington, DC: International Food Policy Research Institute.
- Sakthivadivel, R. 2007. The groundwater recharge movement in India. In: *The agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats for development*, Giordano, M.; Villholth, K.G. (eds). Wallingford, UK: CABI. 196-210. (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Series 3). Доступен на сайте: <http://www>.

[iwmi.cgiar.org/publications/CABI\\_Publications/CA\\_CABI\\_Series/Ground\\_Water\\_Protected/Giordano\\_1845931726-Chapter10.pdf](http://iwmi.cgiar.org/publications/CABI_Publications/CA_CABI_Series/Ground_Water_Protected/Giordano_1845931726-Chapter10.pdf) (ссылка проверена 20.02.2012).

Shah, T.; Molden, D.; Sakthivadivel, R.; Seckler, D. 2000. The global groundwater situation: Overview of opportunities and challenges. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI).

Sharma, K.D. 2009. Groundwater management for food security. *Current Science* 96(11): 1,444.

Шерфетдинов Л. З. Ресурсы подземных вод южного склона бассейна Аральского моря // «Водные ресурсы, проблемы Арала и окружающая среда». Ташкент: Университет. Стр. 40-50. 2000 г.

Тихонова К.А. Использование регулируемого подземного водохранилища в комплексе с каскадом насосных станций для целей орошения крупных земельных массивов // Материалы международного симпозиума по водохозяйственным системам. Прага. 1972 г.

Tuinhof, A.; Olsthoorn, T.; Heederik, J.P.; de Vries, J. 2002. Management of aquifer recharge and subsurface storage - A promising option to cope with increasing storage needs. In: Management of aquifer recharge and subsurface storage. Доступен по ссылке: [siteresources.worldbank.org/.../GWMATE\\_Final\\_booklet.pdf](http://siteresources.worldbank.org/.../GWMATE_Final_booklet.pdf) (ссылка проверена 7.06.2013 г.)

Wandert, B. 2009. Fergana Valley Water Resources Management project- Phase I. Environmental assessment. The World Bank. 141c.

Wang, J.; Huang, J.; Rozelle, S. 2005. Evolution of tubewell ownership and production in the northern China plain. *Austral. J. Agric. Res. Econ.*, 49(2): 177-195.

Waterloo Hydrogeologic Inc. 2000. Visual MODFLOW user's manual. Waterloo Hydrogeologic Inc., Canada.

Xu, G.; Liu, L.; Fei, Y.; Li, D.; Qian, Y. 2009. Research on the adjustment of groundwater storage in the North China Plain. *Resources Science* 31: 375-381. (на китайском языке)



## IWMI Research Reports

---

- 151 *Managed Aquifer Recharge: The Solution for Water Shortages in the Fergana Valley*. Akmal Karimov, Vladimir Smakhtin, Aslon Mavlonov, Vecheslav Borisov, Inna Gracheva, Fazleddin Miryusupov, Jamol Djumanov, Tatyana Khamzina, Rustam Ibragimov and Botir Abdurahmanov. 2013. (Also available in Russian).
- 150 *Glacier Systems and Seasonal Snow Cover in Six Major Asian River Basins: Hydrological Role under Changing Climate*. Oxana S. Savoskul and Vladimir Smakhtin. 2013.
- 149 *Glacier Systems and Seasonal Snow Cover in Six Major Asian River Basins: Water Storage Properties under Changing Climate*. Oxana S. Savoskul and Vladimir Smakhtin. 2013.
- 148 *Evaluating the Flow Regulating Functions of Natural Ecosystems in the Zambezi River Basin*. Matthew McCartney, Xueliang Cai and Vladimir Smakhtin. 2013.
- 147 *Urban Wastewater and Agricultural Reuse Challenges in India*. Priyanie Amerasinghe, Rajendra Mohan Bhardwaj, Christopher Scott, Kiran Jella and Fiona Marshall. 2013.
- 146 *The Water Resource Implications of Changing Climate in the Volta River Basin*. Matthew McCartney, Gerald Forkuor, Aditya Sood, Barnabas Amisigo, Fred Hattermann and Lal Muthuwatta. 2012.
- 145 *Water Productivity in Context: The Experiences of Taiwan and the Philippines over the Past Half-century*. Randolph Barker and Gilbert Levine. 2012.
- 144 *Revisiting Dominant Notions: A Review of Costs, Performance and Institutions of Small Reservoirs in Sub-Saharan Africa*. Jean-Philippe Venot, Charlotte de Fraiture and Ernest Nti Acheampong. 2012.
- 143 *Smallholder Shallow Groundwater Irrigation Development in the Upper East Region of Ghana*. Regassa E Namara, J.A. Awuni, Boubacar Barry, Mark Giordano, Lesley Hope, Eric S. Owusu and Gerald Forkuor. 2011.
- 142 *The Impact of Water Infrastructure and Climate Change on the Hydrology of the Upper Ganges River Basin*. Luna Bharati, Guillaume Lacombe, Pabitra Gurung, Priyantha Jayakody, Chu Thai Hoanh and Vladimir Smakhtin. 2011.
- 141 *Low-cost Options for Reducing Consumer Health Risks from Farm to Fork Where Crops are Irrigated with Polluted Water in West Africa*. Philip Amoah, Bernard Keraita, Maxwell Akple, Pay Drechsel, R.C. Abaidoo and F. Konradsen. 2011.

**Electronic copies of IWMI's publications are available for free.**

**Visit**

**[www.iwmi.org/publications/index.aspx](http://www.iwmi.org/publications/index.aspx)**

**Postal Address**

P O Box 2075  
Colombo  
Sri Lanka

**Location**

127 Sunil Mawatha  
Pelawatta  
Battaramulla  
Sri Lanka

**Telephone**

+94-11-2880000

**Fax**

+94-11-2786854

**E-mail**

[iwmi@cgiar.org](mailto:iwmi@cgiar.org)

**Website**

[www.iwmi.org](http://www.iwmi.org)



IWMI is a  
member of  
the CGIAR  
Consortium  
and leads  
the:



**RESEARCH  
PROGRAM ON**  
**Water, Land and  
Ecosystems**

ISSN: 1026-0862  
ISBN: 978-92-9090-774-9