

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГАЗИНИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Приблизительно 1 млрд из 6 млрд мирового населения, проживающего в аридных регионах, испытывает недостаток в доступе к источникам чистой питьевой воды (Biswas, 1993). Засушливые регионы представляют 30 % от всей земной площади. В аридных регионах ресурсы поверхностных вод недостаточны и ненадежны, поэтому запасы подземных вод зачастую являются единственным источником питьевой воды. Усиленный водоотбор с целью водоснабжения в засушливых регионах приводит к критическому истощению и ухудшению качества подземных вод. Одним из способов решения этой проблемы может стать искусственное восполнение запасов подземных вод.

Искусственное восполнение - понятие не новое. Создание искусственных запасов (применяется также термин "магазинирование") производится один или несколько раз в году путем единовременного затопления больших площадей вблизи водозаборного сооружения (естественные понижения, специально обвалованные участки пойм, террас); обычно предварительно производится зачистка слабопроницаемого почвенно-растительного слоя.

В тех или иных формах ИВЗПЗ применяется еще с середины XIX века. В России ИВЗПЗ применяется с конца XIX века (водозаборы г.г. Арзамаса, Винницы, Симферополя). У США долгая история освоения и использования схем ИВЗПВ (до 30 % от общего хозяйственно-питьевого водопотребления). Учебники, документы, директивы, инструкции и много примеров появилось из США, особенно за прошлые два десятилетия. Нидерланды в 1940-е годы начали использовать искусственное восполнение в мелких масштабах за счет инфильтрации речной воды в водоносные пласты. В 1950-е годы начало проводиться крупномасштабное ИВЗПВ в целях водоснабжения крупнонаселенных городов, путем площадного затопления (в дальнейшем используется нагнетание воды через скважины в более глубокие водоносные слои). В 1990-е годы объем восполняемой воды составил 180 млн. м³ в год. В Австралии ИВЗПВ нашло применение столетие назад в небольшом городке Маунт-Гамбир, использовав более 300 дренажных колодцев воды близлежащего озера переводились в карстовый водоносный слой. Приблизительно 15% питьевой воды Германии произведены методами ИВЗПВ. Израиль одна из ведущих стран в исследовании ИВЗПВ. Используют метод инъекций (закачки, нагнетания), подпитывая водоносный слой из озера Киннерет. В настоящее время во многих странах с дефицитом подземных вод с помощью систем ИВЗПЗ обеспечивается до 25-50% общего хозяйственно-питьевого водопотребления.

В Казахстане вопросами искусственного восполнения запасов подземных вод занимаются с середины прошлого века. Одним из первых этот вопрос исследовал Шестаков Ф.В. в связи со строительством водохранилища Сайран в г.Алматы. Известны работы Хордикийнера М.А., Коваленко Г.Г., Напреева В.Ф., Жапарханова С.Ж. и др. В результате проведенных исследований, а также практических изысканий выявлены специфические проблемы при осуществлении ИВЗПЗ. Это конструкция сооружения, включая технологию эксплуатации специальных устройств для пополнения, а также источник и качество "сырой" воды.

Наиболее сложным всегда является вопрос об источнике "сырой" воды. Основные требования к нему: достаточное количество и удовлетворительное качество - существуют нормативные требования к качеству воды, подаваемой на пополнение. Из физических показателей наиболее важный - мутность. Химические ограничения могут быть разнообразными в зависимости от состава пород зоны аэрации и водовмещающей толщи, состава пластовой воды, климатических особенностей. ИВЗПЗ сопровождается рядом физических, физико-химических и биологических процессов - механическое осаждение взвешенных частиц, физическая и химическая сорбция, ионный обмен, коагуляция, микробиологические процессы и др.

Обычно для ИВЗПЗ используют поверхностные воды, реже дренажные воды, очищенные стоки, воды смежных горизонтов.

Предварительная водоподготовка заключается в следующем. Это отстаивание (снижение мутности), использование предварительных фильтров (часто в комплексе с коагулянтами); микрофильтрация (задержка механической взвеси, планктона); аэрация (насыщение кислородом с уничтожением анаэробных бактерий и разложением органических соединений); хлорирование (обеззараживание и окисление органических соединений).

Одной из проблем является кольматация отложений в дне бассейна, несмотря на специальную водоподготовку (снижение мутности до 5-20 мг/л). Выделяют три механизма кольматации:

- механическая - образование поверхностной пленки на дне бассейна и задержка взвешенных частиц в порах придонного слоя (0.1 - 0.5 м) отложений зоны аэрации;
- физико-химическая - за счет выпадения осадка в виде карбонатов и сульфатов кальция, гидроокислов железа и марганца и др;
- биологическая - за счет деятельности бактерий, развития планктона (сине-зеленых водорослей).

В связи с развитием процессов кольматации скорость инфильтрации из бассейна довольно быстро снижается (рис.1) и через некоторое время работа бассейна становится малоэффективной. Длительность так называемого фильтроцикла составляет в разных условиях 3 - 6 мес (иногда более), после чего производится чистка бассейна путем механического удаления закольматированных донных отложений с последующей подсыпкой фильтрующей гравийно-песчаной смеси. На период чистки в работу запускается резервный бассейн.

С целью более длительного сохранения фильтрующей способности донных отложений производится высадка в бассейнах водной растительности (камыш, рагос и др.). При этом дополнительно улучшается очистка воды; так, например, камыш не только разрыхляет грунт дна, повышая его фильтрационные свойства, но и поглощает фенолы, хлор и др.

В связи с существованием слабопроницаемой пленки инфильтрация из бассейнов почти всегда имеет характер "дождевания" (аналогично фильтрации из несовершенной реки при отрыве уровня от подошвы экрана). Поэтому в расчетных схемах инфильтрационные бассейны следует рассматривать как граничные элементы с условием 2-го рода (заданный расход инфильтрации - с реальной динамикой во времени, либо в осредненных по времени величинах).

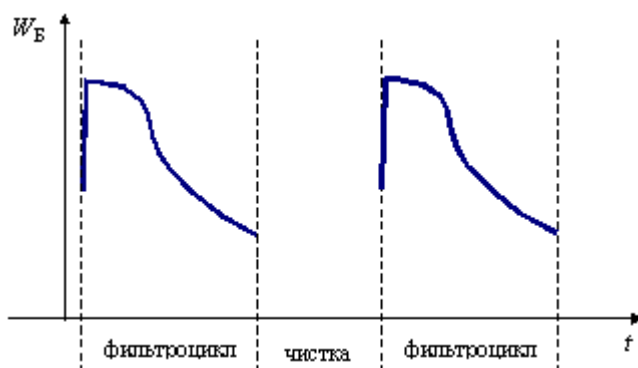


Рис.1. Изменение скорости инфильтрации из бассейнов во времени

В практике водоснабжения все более широко применяют инфильтрационные водозаборы при искусственном восполнении подземных вод. Сущность этого метода состоит в переводе поверхностной воды в подземный водоносный горизонт через специально устраиваемые инфильтрационные сооружения. Метод ИВЗПВ позволяет решать ряд задач таких, как:

- увеличение запасов намечаемого к эксплуатации водоносного горизонта за счет поверхностных источников;

- увеличение дебита действующих водозаборов подземных вод;
- создание подземных водохранилищ;
- улучшение качества воды, забираемой для целей водоснабжения и др.

Система искусственного восполнения подземных вод включает:

- источник пополнения;
- сооружения для подготовки воды, переводимой в подземные горизонты;
- установки для подачи воды на инфильтрационные сооружения;
- водозаборы подземных вод.

Сооружения для инфильтрации, являющиеся основным элементом установки ИВЗПВ, бывают двух основных типов: открытые и закрытые. К первым относятся бассейны, каналы, площадки и др.; ко вторым – скважины, колодцы, галереи (рис. 2, рис. 3).

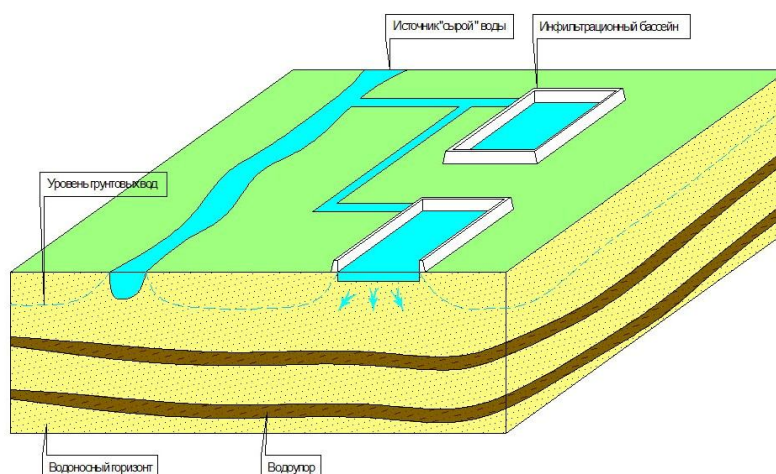


Рис. 2. Питание из инфильтрационного бассейна

Целесообразность применения тех или иных инфильтрационных сооружений определяется гидрогеологическими и климатическими условиями участка работ, качеством воды в источнике пополнения, а также наличием свободных площадей. Инфильтрационные сооружения могут быть непрерывного и периодического действия.

Открытые инфильтрационные сооружения используются, как правило, для пополнения запасов подземных вод, первого от поверхности земли водоносного горизонта. Наибольшее применение в системах ИВЗПВ нашли сооружения с инфильтрационными бассейнами. Они представляют собой систему бассейнов, дно которых выложено слоем песка.

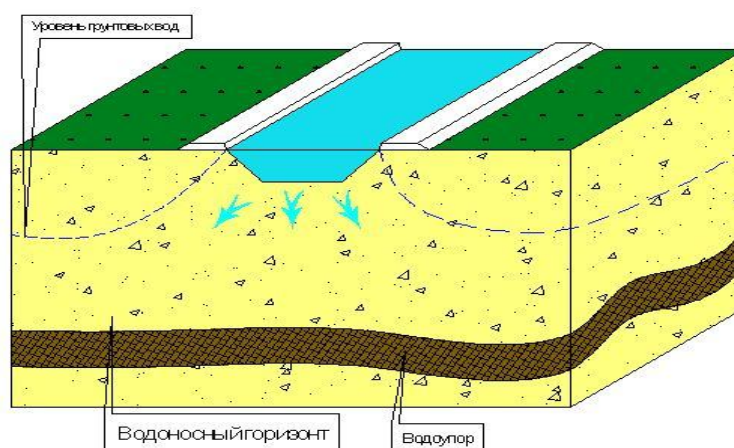


Рис. 3. Инфильтрация из канала

Инфильтрационные сооружения закрытого типа рекомендуется применять в случае, когда на поверхности земли залегают относительно слабопроницаемые породы, или при слоистом строении зоны аэрации. Они распространены в районах со сложными условиями строительства и эксплуатации открытых инфильтрационных сооружений.

В зависимости от характера размещения в водоносном пласте закрытые инфильтрационные сооружения подразделяют на горизонтальные и вертикальные. Такие горизонтальные сооружения, как трубчатые дрены, галереи и штольни, не нашли широкого применения из-за отсутствия эффективных методов восстановления их мощности и несовершенства конструкций.

Наиболее широко используются вертикальные закрытые инфильтрационные сооружения: шурфы, шахтные колодцы и буровые скважины. Шурфы, как правило, устраивают диаметром до 4 метров и при глубине уровня грунтовых вод до 5 м; шахтные колодцы – при уровне грунтовых вод на глубине до 30 м. Инфильтрация из этих сооружений может происходить через дно, боковые стенки или одновременно через боковые стенки и дно.

Процесс инфильтрации при восполнения подземных вод неглубокого залегания можно разделить на три фазы.

Первая – наполнение инфильтрационных бассейнов водой и начало нисходящего движения фронта влажности (вода-воздух). Движение происходит главным образом за счет всасывающей способности грунтов зоны аэрации вследствие разницы коэффициентов их водонасыщения. Гидравлический градиент однозначно больше 1. В течение этой фазы, хотя через дно бассейна инфильтрация и не равна нулю, восполнение водоносного пласта отсутствует поскольку имеет место увлажнение ненасыщенных периферийных участков зоны аэрации и накопление там воды. Продолжительность этой фазы инфильтрации зависит от состава верхнего слоя грунта и зоны аэрации, начальной степени их насыщения, пьезометрического напора и глубины залегания уровня грунтовых вод.

Вторая - бахрома увлажнения достигает зеркала грунтовых вод. Причем смыкание с водоносным горизонтом еще не произошло. Вода заполняет поры капилляров и, по сути, является капиллярной. Под воздействием начинающегося питания горизонта происходит подъем его уровня. Влажность грунта в верхних слоях зоны уравнивается и приближается к максимальной величине насыщения (около 100%), проницаемость также стремится к величине, свойственной зоне насыщения, всасывающая способность грунта в этой зоне практически исчезает, движение жидкости становится гравитационным, гидравлический градиент около 1, однако имеет тенденцию к его незначительному возрастанию.

Третья - устанавливается гидравлическая связь между плоскостью инфильтрации и поверхностью водоносного горизонта. Движение жидкости происходит в среде, полностью заполненной водой. Гидравлический градиент становится характеристикой всей водонасыщенной среды (от долей % до нескольких %), в которой происходит движение нисходящего инфильтрационного потока, и уменьшается до предела, соответствующего стационарному режиму фильтрации.

Это положение очень важно, поскольку определяет, что для поддержания оптимального режима процесса инфильтрации и обеспечения максимального объема поступления воды необходимо соблюдать режим, соответствующий второй фазе.

Время, за которое фильтрующийся из инфильтрационного бассейна поток достигает зеркала естественного потока, определяется по формуле (1):

$$T = \frac{\mu}{K} \left(h_0 - (H + H_K) \ln \frac{H + H_K + h_0}{H + H_K} \right) \quad (1)$$

где μ - недостаток насыщения грунта, т.е. разность между полной влагоемкостью породы и естественной влажностью, в объемном выражении;

H – глубина воды в инфильтрационном бассейне;

h_0 - глубина залегания грунтовых вод от дна водохранилища;

H_K - капиллярное давление менисков на границе воды и сухой породы;

Общий объем профильтровавшейся в грунт воды к моменту смыкания фильтрационных вод с грунтовыми водами или с водоупорным слоем определяется по формуле:

$$V_{об} = \mu B h_0$$

где B - средняя ширина инфильтрационного бассейна по урезу воды

В Казахстане простейшие схемы искусственного восполнения запасов подземных вод начали применяться с тридцатых годов прошлого столетия, чему во многом способствовало пересыхание береговых инфильтрационных колодцев из-за неравномерного сезонного распределения поверхностного стока в наиболее маловодные годы.

Методы ИВЗПВ в той или иной степени применяются на Аягузском, Жангизтобинском, Талдысайском, Жаратасском и некоторых других инфильтрационных водозаборах.

С целью выявления перспектив использования и развития метода искусственного восполнения запасов подземных вод «Зональным гидрогеолого-мелиоративным центром» Комитета по водным ресурсам МСХ РК совместно с кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии КазНТУ им.К.И.Сатпаева было проведено районирование предгорной зоны южного Казахстана, территориально ограниченной границами Алматинской и южной частью Восточно-

Казахстанской области. При этом критериями выделения тех или иных районов служили следующие параметры:

- наличие и объем поверхностного стока, являющегося источником питания грунтовых вод в процессе намеренного увеличения площади и объема искусственно создаваемых ёмкостных запасов;
- мощность и коллекторские свойства первого от поверхности грунтового водоносного горизонта, способного служить естественным хранилищем искусственно создаваемых запасов подземных вод;
- фильтрационные свойства водовмещающей среды, позволяющие достигнуть самоочищения воды в процессе фильтрации;
- небольшая (до 1 - 3 м) мощность покровных отложений;
- качество поверхностных вод.

Районирование проводилось в 1:500000 масштабе на основе изданных гидрогеологических карт, разрезов, анализе фактического материала, полученного при производстве съемочных и изыскательских работ и т.п.

Масштаб основы и изученность территории позволили в первом приближении выявить две зоны: перспективную и средней перспективности. Перспективная зона занимающая верхние части конусов выноса и предгорных шлейфов, сложена аллювиальными и аллювиально-пролювиальными отложениями четвертичного возраста, выполняющими русла и долины рек.

Количество рек и временных водотоков в районе исследований (предгорная зона бассейна оз. Балхаш) составляет более 40 тысяч. Их общая протяженность превышает 100 тыс. км. Примерно 2 тысячи водотоков имеют длину свыше 10 км и общую порядка 53 тысячи. Большая их часть относится к изучаемой территории.

Расположение на юге и юго-востоке бассейна высокогорных хребтов обуславливает преимущественное направление стока от периферийных районов к его центру. Многие реки, не доходя до озер, теряются в песках.

Особенностью гидрографии описываемой территории является резкое изменение плотности речной сети отдельных ее частей: большая густота в горных районах ($0,6-3,2 \text{ км/км}^2$) сочетается с редкой речной сетью в центральной равнинной части территории (до $0,01 \text{ км/км}^2$). В предгорных районах широко представлены реки типа «карасу».

При выборе участков для искусственного восполнения подземных вод немаловажное значение имеет форма речных долин и морфометрические характеристики русел рек. Они обычно заметно изменяются по их длине. Узкие в верхнем и среднем течении горных рек шириной не более сотни метров, при выходе на равнину она может достигать нескольких километров. Долины рек в верхнем течении представляют собой отроги, в среднем – принимают вид ущелий, в низовьях – зачастую неявно выражены и сливаются с окружающей местностью.

Перспективные для искусственного восполнения подземных вод площади главным образом приурочены к участкам, сложенным аллювиальными отложениями четвертичного возраста, преимущественно современного и верхнечетвертичного. В долинах рек (Кескентерек, Коксу, Тентек, Биже и др.) водовмещающие породы литологические представлены гравием, щебнем, песками, гравийно-галечниками, валунами. Мощность отложений изменяется от нескольких до 40 м., достигая на некоторых участках 270м. Уровни грунтовых вод залегают на глубине от 0,8 до 10 м. Водообильность аллювиальных отложений высокая. Расходы скважин составляют $5,0-75 \text{ дм}^3/\text{с}$, при понижениях уровня соответственно 0,2-9,8 м. Воды пресные, с минерализацией $0,2-0,4 \text{ г/дм}^3$, химический состав гидрокарбонатный кальциевый. Основным источником питания подземных вод являются фильтрационные потери поверхностного стока рек и ручьев. К аллювиальным отложениям приурочены несколько месторождений подземных вод (например, Чубарское с величиной эксплуатационных запасов $354 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$),.

Четвертичные аллювиально-пролювиальные, и частично, делювиально-пролювиальные отложения также могут быть отнесены к перспективным. Они занимают большую территорию межгорных впадин и представляют несколько водоносных горизонтов, гидравлически связанных между собой. Водовмещающие валунно-гравийно-галечники с песчаным заполнителем, пески, песчаники, гравелиты чередуются с водоупорными или слабоводопроницаемыми суглинками. Мощность водоносного комплекса в межгорных впадинах колеблется от нескольких до 150 м. Мощность водоносных и водоупорных прослоев довольно непостоянна и колеблется от 1,5-3 м до 30-50 м. Подземные воды безнапорные и залегают на глубине от 2,5 до 35 м. Водообильность комплекса

высокая. Удельные дебиты достигают 10 дм³/с. Воды пресные с величиной сухого остатка не более 1 г/дм³, химический состав гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-сульфатный кальциевый, натриевый.

Водоносный комплекс питается за счет фильтрации поверхностного стока рек и ручьев, инфильтрации атмосферных осадков и перетока из нижележащих водоносных горизонтов, подтока со стороны горных сооружений. Разгрузка осуществляется в долинах рек в виде родников и мочажин с дебитами 0,1-10,0 дм³/с.

В аллювиально-пролювиальных, делювиально-пролювиальных отложениях разведаны Капальское и Кугалинское месторождения с суммарными эксплуатационными запасами 23,32 тыс.м³/сут.(Смоляр В.А., Мустафаев С.Т. Ресурсы подземных вод Балхашской впадины, 2007).

К зоне средней перспективности отнесены флювиогляциальные и делювиально-пролювиальные четвертичные отложения, распространенные во внутригорных впадинах, а также слагающие конуса выноса в западной части Джунгарского Алатау.

Водовмещающие отложения представлены галькой, дресвой с разномерным заполнителем. Мощность отложений иногда достигает 100-150 м., чаще – до 50 м. Подземные воды залегают на глубине от нескольких до 15 м. Водообильность до 10-15 дм³/с. Воды пресные с минерализацией до 1 г/ дм³, гидрокарбонатные кальциево-натриевые. Питание водоносного комплекса происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, таяния ледников и снежников, потерь поверхностного стока и подтока трещинных вод палеозоя.

Проведенное районирование является начальным этапом выявления перспектив искусственного восполнения подземных вод в Казахстане. Однако полученные результаты уже сейчас показывают, что применение метода магазинирования может стать эффективным способом решения проблемы водоснабжения в районах дефицита питьевой воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Антоненко В.Н.* Перспективы магазинирования подземных вод в Юго-Восточном Казахстане. Тр. междуна. научно-практ. конф. «Вода: ресурсы, качество, мониторинг, использование и охрана вод», Алматы, 2008.
2. *Антоненко В.Н., Кульдеев Е.И.* Исследование процесса искусственного восполнения подземных вод. Матер. межд. конф. «Современное состояние наук о Земле», посв. памяти В.Е.Хаина. Москва. 2011.
3. *Bridget R. Scanlon*, The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geosciences, Austin, TX, 78713-8924, USA. «Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions», 2006.
4. *Dr. R. Murray*, Department of Water Affairs and Forestry, «Ground water Africa», 2009.

Резюме

Мақалада су ресурстарының тапшылығы және олардың жасамды толықтыруы келтіріледі. Шетел мен отандық дерекнамаларынан мысалдар көрсетілген. Су ресурстарын жасамды толықтыру тәсілдері сипатталынған. Таңдап алынған әдістеменің тиімділігі көрсетілген. Біздің мемлекетімізде жасамды толықтыру әдістерін болашақта қолдану аудандары келтірілген.

Summary

The article reflects problems of water scarcity and a method of groundwater artificial recharge (storage) as a way of solving this problem. Here given examples from foreign and national sources, reflected main methods of artificial recharge, shown the efficiency of chosen methodology and highlighted perspective area for the artificial recharge in our country.

КазНТУ им. К.И. Сатпаева

Поступила 10.04.12 г.