Теория и практика устойчивого экономического развития

УДК 628.1.032.004.12

DOI: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.064-079

ВОДНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ В ПРОБЛЕМАХ РЕГИОНАЛЬНОГО УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

А. А. Баламутова, Н. С. Попов

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», г. Тамбов, Россия*

Рецензент д-р техн. наук, профессор С. И. Лазарев

Ключевые слова: водный менеджмент; информационно-аналитические системы; подземные воды; принятие решений; природо-промышленные системы; устойчивое развитие.

Аннотация: В последние десятилетия деятельность человека оказывает все большее влияние на гидрологические системы. Концепция устойчивого развития водных инфраструктур в субъектах РФ является важной основой для их использования в интересах настоящего и будущих поколений людей. Рассмотрены современные особенности водного менеджмента, приведен пример водоснабжения в г. Тамбове, сделан вывод о необходимости создания проблемно-ориентированной информационно-аналитической системы поддержки и принятия решений в условиях неопределенностей будущих социально-экономических и экологических вызовов.

*Вода была дана волшебная
власть стать соком жизни на Земле*

Леонардо да Винчи

Введение

Вода является уникальным творением Природы. С ее участием на Земле возникло и активно развивалось живое вещество, оказавшее колоссальное влияние на эволюцию биосферы. По мысли академика В. И. Вернадского: «Вода стоит особняком в истории планеты. Нет при-

Баламутова Анна Андреевна – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: eco@mail.tstu.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов, Россия.

родного тела, которое могло бы с ней сравниться по влиянию на ход основных, самых грандиозных, геологических процессов. Не только земная поверхность, но и глубокие – в масштабах биосферы – части планеты определяются, в самых существенных своих проявлениях, ее существованием и ее свойствами» [1].

Освоение водных ресурсов всегда рассматривалось в качестве ключевого фактора развития государства, поскольку вода необходима для жизни и здоровья людей, производства продуктов питания и осуществления хозяйственной деятельности. Региональное устойчивое развитие и рост общественного благосостояния сегодня во многом зависят от решения задач охраны и рационального использования водных ресурсов, степени развития и эффективности работы водохозяйственных инфраструктур: коммунального водоснабжения и водоотведения, гидромелиорации и гидроэнергетики, состояния дамб и шлюзов, плотин и каналов и т.п.

К началу XXI века проблема сохранности «первичного» состояния водных ресурсов стала одной из ведущих мировых научно-технических проблем. Она вышла за национальные границы и приобрела глобальный масштаб. Возможность самоочищения природных вод при переходе из одного агрегатного состояния в другое породило иллюзию неизменности и неисчерпаемости водных ресурсов, отчего в обществе сложилось безответственное отношение к результатам их эксплуатации.

По прогнозам экспертов ООН [2] в случае изменений климата, роста народонаселения и расширения урбанизированных территорий дефицит воды в мире к 2030 г. составит 40 %. Самым болезненным окажется дефицит пресной воды: из общего количества воды в гидросфере 97,35 % – соленые воды, а 2,65 % – пресные, из которых только 0,3 % – пресная вода озер, рек и водохранилищ, наиболее доступная для жизнедеятельности человека [3]. Дефицит пресной воды способен стать преградой для роста экономики и триггером «водных» конфликтов, порождающих раздоры между соседними государствами. А вместе с тем даже в развитых странах до 30 % запасов пресной воды теряется из-за утечек, а в некоторых крупных городах потери могут достигать 70 %.

На Международной конференции по водным ресурсам и окружающей среде, состоявшейся в 1992 г. в г. Дублине (Ирландия), принято Заявление (известное как Дублинские принципы), содержащее рекомендации по сокращению дефицита воды. Один из принципов гласит о том, что пресная вода – это ограниченный и уязвимый ресурс, необходимый для поддержания жизни, развития и окружающей среды и, тем самым, развеивает миф о «неизменности и неисчерпаемости» водных ресурсов.

Дублинские принципы нашли отражение в программных документах ряда международных форумов, посвященных охране окружающей среды, рациональному природопользованию и экономическому развитию – в Повестке дня на XXI век, принятой на конференции ООН по охране окружающей среды и развитию в Рио-де-Жанейро в 1992 г., материалах Всемирного Саммита по устойчивому развитию, проведенному в Йоханнесбурге (ЮАР) в 2002 г. В декабре 1992 г. Генеральная Ассамблея ООН приняла резолюцию 47/193, в которой день 22 марта объявляется ежегодным праздником – Всемирным днем водных ресурсов [4]. В России этот день отмечается с 1995 г.

Глобальная значимость проблемы использования водных ресурсов такова, что ООН предприняла целый ряд важных инициатив: 2008 г. провозглашен Международным годом санитарии, 2013 г. – Международным годом пресной воды; 2017 г. – Международным годом водного сотрудничества; 2005 – 2015 гг. объявлены Международным десятилетием действий «Вода ради жизни». В декабре 2016 г. Генеральная Ассамблея ООН приняла резолюцию 71/222, в которой 2018 – 2028 гг. названы Международным десятилетием действий «Вода для устойчивого развития», направленным на достижение к 2030 г. 17 Целей устойчивого развития (ЦУР), одобренных на Саммите ООН по устойчивому развитию в Нью-Йорке в 2015 г. [5]. Цель № 6 включает сокращение потерь воды, которая может быть утилизирована, и увеличение ее объемов переработки и очистки.

Ежегодно мероприятия, проводимые в рамках Дня водных ресурсов, посвящают наиболее важной теме. В 2022 г. День водных ресурсов будет проходить под девизом: «Подземная вода: делая невидимое видимым». Выбор данной темы оправдан тем, что 99 % пресной воды, находящейся в толще Земли, составляют подземные воды [3].

Вода в жидком и парообразном состояниях является «нестационарным» ресурсом, движущимся через природные среды и время и выполняющим две важнейшие функции: 1 – поддержания жизни биосистем (в качестве пищевого продукта, среды обитания и размножения); 2 – агента-носителя растворенных химических веществ, образуемых в результате взаимодействий подземного потока воды с минералами земной коры, просачивающимися жидкими отходами хозяйственной деятельности и поверхностными водами, образуемыми из атмосферных осадков.

В гидрологическом цикле¹ резервуар подземных вод выполняет функцию буфера колебаний воды в реках, озерах и на увлажненных землях, вызванных изменениями погодных условий, климата или забором воды из скважин. Необходимо учитывать тот факт, что человек способен ускорить или затормозить естественную циркуляцию воды на местном уровне – в результате рубки лесов, осушения земель, проведения гидромелиоративных и иных мероприятий.

Несмотря на то, что подземные воды составляют малую часть ресурсов гидросферы, они распространены повсеместно, внутренне взаимосвязаны, контактируют не только с поверхностными водами и водами атмосферы, но и со всеми видами природных ресурсов, содержащимися в толще Земли. В результате этого реализуемые водохозяйственные мероприятия прямо или косвенно оказывают на водные объекты свое влияние, распространяемое подземными водами по всему пространству водовмещающих пород.

В работе [6] отмечен ряд сложностей в решении проблем с подземными водами:

1. Наличие большого запаздывания между причиной возникновения проблемы и временем осознания ее последствий. Очень часто причинно-следственные связи настолько неочевидны, что не побуждают ученых к поиску решений в нужном направлении.

¹ Гидрологический цикл обеспечивает относительную стабильность природных условий за счет постоянно действующего механизма образования и распределения вод между океаном, сушей и атмосферой.

2. Для многих проблем с подземными водами, и особенно проблем с их загрязнением, корректирующие действия требуют слишком много времени для доказательства полезности их осуществления. Основная выгода от принятых мер вероятнее всего станет достоянием будущих поколений людей.

3. Несмотря на то, что проблемы с подземными водами являются составной частью глобального водного кризиса, они оказываются и локальными, свойственными лишь одному водоносному горизонту, конкретному населенному пункту, отдельной скважине или единственной семье. Поэтому структура системы менеджмента подземных вод должна быть достаточно гибкой, чтобы адекватно реагировать на проблемы разного уровня: от водоносного слоя до специфической скважины.

В целях сохранности водных ресурсов Закон РФ «О недрах» признает подземные воды государственной собственностью, то есть общественным благом [7]. Вместе с тем необходимо, чтобы забор воды из природных источников обладал правом узупрукта, с контролем за количеством забираемой воды и ее качеством при сбросе в природную среду [4].

В настоящее время менеджмент крупных водохозяйственных систем предполагает решение целого ряда нормативно-правовых, экономических, организационных и других задач. Так, например, в связи с климатическими изменениями требуется корректировать характеристики речного стока, учитывать риски затяжных маловодий и экстремальных паводков, пересматривать режимы эксплуатации скважин, водохранилищ, гидротехнических сооружений, водопроводных сетей и т.д.

Стратегическое управление водными ресурсами существенно усложняется из-за нарастания на длительном отрезке времени неопределенностей их собственных характеристик, задаваемых гидрологическими прогнозами, из-за неясности будущих социально-экономических условий жизни, а также запросов водопользователей, водопотребителей и экологов.

Истощение запасов подземных вод и их загрязнение часто становятся «отложенными» проблемами, адресуемыми будущим поколениям людей. В таких ситуациях не соблюдается этическая норма «экосправедливости», ставшая фундаментальной основой концепции устойчивого развития экономики, природы и общества. А в условиях неопределенности полезен «принцип предосторожности», содержащийся под № 15 в Декларации Рио-де-Жанейро по окружающей среде и развитию (1992 г.) [8]. Его смысл состоит в следующем: «В целях защиты окружающей среды государства в зависимости от своих возможностей широко используют принцип принятия мер предосторожности. В тех случаях, когда существует угроза серьезного или необратимого ущерба, отсутствие полной научной уверенности не используется в качестве предмета или отсрочки принятия эффективных, с точки зрения затрат, мер по предупреждению ухудшения состояния окружающей среды».

Этот принцип широко применяют проектировщики водохозяйственных систем, в том числе и водозаборных, но в меньшем степени его практическое применение связано с предупреждениями загрязнений подземных вод [9]. Данное обстоятельство объясняется сложностью выполнения прогнозов загрязнения подземных вод от различных антропогенных источников, действующих в конкретной ситуации.

В работе [10] рассмотрен вопрос о необходимости создания специального инструмента менеджмента, а именно – системы прогнозирования комплекса негативных воздействий на водные источники и мер охраны природы при обосновании и выборе мест размещения водохозяйственных и водоохраных сооружений. Особое значение такой инструмент имеет для решения региональных проблем устойчивого развития, осложненных неопределенностями состояний природы и общества на длительном отрезке времени. В этой связи целями настоящей работы являются: анализ современных подходов к решению водоресурсных задач; выявление особенностей менеджмента подземных вод в проблеме устойчивого развития; определение научно обоснованных способов ее решения на региональном уровне.

Подземные воды в задачах коммунально-бытового водоснабжения

Основной задачей централизованного водоснабжения является бесперебойное удовлетворение потребностей населения и производств в необходимых количествах воды нужного качества, обладающей достаточным напором. Источниками водоснабжения служат поверхностные и подземные воды. Очевидное преимущество последних заключено в более высокой степени их защищенности от поверхностных загрязнений.

С декабря 2011 г. в России действует Федеральный закон № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении», определяющий требования к качеству и безопасности воды, подаваемой централизованной и децентрализованной системами горячего и холодного водоснабжения. В законе закреплено понятие качества и безопасности воды у потребителя как совокупности показателей, характеризующих ее физико-химические, бактериологические, органолептические и другие свойства.

В Тамбовской области в 2009 г. принят закон № 568-З «О питьевой воде и питьевом водоснабжении в Тамбовской области», целями которого являются установление правовых гарантий удовлетворения потребности граждан и юридических лиц в качественной питьевой воде, утверждение хозяйственно-экономических основ питьевого водоснабжения. Согласно ГОСТ 2761–84 источниками централизованного водоснабжения могут быть следующие воды: межпластовые напорные; межпластовые безнапорные; искусственно наполняемые и подрусловые подземные; поверхностные (реки, водохранилища, озера, каналы). Глубина залегания напорных и безнапорных вод – 50...1 000 метров.

Природная вода представляет собой открытую гетерогенную сплошную среду, обменивающуюся веществами и энергией с сопредельными средами и биологическими компонентами. Схематически элемент подземного водного горизонта можно рассматривать в виде «гидрогеохимического реактора» проточного типа (рис. 1). Типично подземные воды содержат вещества трех групп [6]: основные – Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} ; второстепенные – K^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Si^{2+} , NO_3^- , F^- и растворенный органический углерод; побочные вещества в следовых количествах – I, Se, Cd, Pb, Zn, B, Sr, U. Кроме того, в воде могут содержаться и растворенные газы: CO_2 , O_2 ,

Рис. 1. Взаимодействие воды с водоупорными породами водоносного горизонта:
 1 – локальный объем водного тела; 2 – водоносный горизонт; 3, 4 – верхние и нижние водоупорные породы соответственно; 5 – линия тока; 6–9 – неплотности в водоупорных породах; 10 – просачивание воды из верхнего горизонта; 11 – просачивание солей из нижнего горизонта; 12 – дренаж воды в нижние горизонты; 13 – выход воды в верхний горизонт; 14 – микроорганизмы; 15 – коллоидные частицы; 16 – химические и биохимические реакции; 17 – процессы кристаллизации / осаждения; 18 – ионообменные реакции; 19 – процессы растворения / выщелачивания; 20 – минеральные отложения

N_2 , H_2S , CH_4 . В результате сочетания этих веществ в конкретных земных условиях формируется уникальное «природное» качество воды, дополняемое температурой, цветом, запахом, мутностью и микробным составом.

Важно отметить, что качество подземных вод на различных участках водоносного слоя может меняться из-за разнообразия условий его формирования. Различают 4 класса основных природных процессов, формирующих качество подземных вод: растворение / выщелачивание; кристаллизация; сорбция и ионный обмен; химические и биохимические реакции [11, с. 54 – 83].

К антропогенным факторам формирования качества воды в общем случае относятся следующие:

- чрезмерное водопотребление, ведущее к снижению уровня водного стола и образованию замкнутых депрессионных воронок. В результате возникает подсосывание минеральных вод из нижележащего водоносного слоя;
- несоблюдение предписаний при разработке и эксплуатации скважин, что приводит к ухудшению в них качества воды;
- использование пестицидов как стойких загрязнителей воды, проникающих с поверхности земли;
- создание полей фильтрации, из которых примеси с дождевыми водами просачиваются через неплотности водоупорных пород и попадают в зоны питания водоносного горизонта.

Поскольку любое ухудшение качества питьевой воды отражается на здоровье людей, в системах водоснабжения используют самые современные технологии ее доочистки и обеззараживания [12].

В качестве рабочего примера кратко охарактеризуем систему централизованного снабжения жителей г. Тамбова водой из подземных источников. Подъем основной массы воды осуществляется из 101 артезианской скважины с глубины 70...100 м шестью водозаборными узлами (ВЗУ). Общая протяженность распределительных сетей составляет 793 км. Из 26 отдельно стоящих скважин вода напрямую поступает к жителям города. Из остальных скважин вода подается на станции водоподготовки ВЗУ, где она очищается от взвешенных веществ и железа и обеззараживается гипохлоритом натрия, а затем попадает в водопроводную сеть. Производственная мощность всех ВЗУ г. Тамбова составляет 143 тыс. м³/сут. Поверхностный источник воды используется на ВЗУ «Студенка» с производительностью 3,5 тыс. м³/сут. Для поддержания гидравлического режима в сети используются: 6 насосных станций 2-го подъема, 2 станции 3-го подъема и 97 повысительных станций подачи воды на верхние этажи многоквартирных домов.

Мониторинг геологической среды и водных объектов осуществляет ОСП территориальный центр «Тамбов – Геомониторинг» на 73 скважинах наблюдательной сети. Наблюдения ведутся по трем основным показателям: уровню, температуре и качественному составу подземных вод. Анализ качества воды проводят: лаборатории в составе ВЗУ, городская СЭС и Центральная лаборатория ООО «РКС-Тамбов». Характерный химический состав воды из скважин ВЗУ № 3 приведен в качестве примера в табл. 1. Анализ этих данных указывает на то, что для воды г. Тамбова свойственно повышенное содержание железа и солей жесткости, в связи с чем требуется ее очистка до норм СанПиН 1.2.3685-21.

В районах интенсивной добычи подземных вод (городов Тамбов, Котовск, Мичуринск, Рассказово) часто происходит изменение химического состава воды. В зонах близкого залегания к поверхности продуктивных горизонтов имеют место загрязнения подземных вод за счет инфильтрации с поверхности. На территориях размещения промышленных объектов наблюдается инфильтрация промышленного загрязнения в горизонты с зонами свободного водообмена, а в районах интенсивной добычи воды изменение ее химического состава происходит из-за подсосывания некондиционных вод из нижележащих горизонтов. Детальное описание гидрохимического состояния подземных вод г. Тамбова и Тамбовской области приведено в работе [13].

Обобщая официальные данные по загрязнениям подземных вод, можно сделать следующие выводы:

- основными источниками загрязнений являются отстойники и поля фильтрации различных предприятий, полигоны и свалки ТКО, нефтебазы и т.п.;

- основной причиной несоответствия гигиеническим нормативам проб воды из источников водоснабжения является природный состав подземных вод (повышенное содержание железа, солей жесткости, мутность и цветность);

Таблица 1

Показатели качества подземных вод на ВЗУ-3, скв. № 31

Показатель	Единица измерения	Нормативы (предельно допустимые концентрации (ПДК)), не более	Фактические значения концентраций по данным	
			«РКС-Тамбов»	Отдел санэпид-надзора
Обобщенные показатели				
Водородный показатель	pH	В пределах 6...9	7,44	7,55
Общая минерализация (сухой остаток)	мг/л	1000 (1500)*	527	543,2
Жесткость общая	мг-экв./л	7,0 (10)*	7,4	6,9
Окисляемость перманганатная	мг/л	5,0	0,71	—
Неорганические вещества				
Бор (суммарно: B ²⁺ , B ³⁺)	мг/л	0,5	—	< 0,05
Железо (суммарно: Fe ²⁺ , Fe ³⁺)		0,3 (1,0)*	1,45	0,94
Марганец (суммарно) (Mn ⁿ⁺ _{сум} , при 2 < n < 7)		0,1 (0,5)*	—	0,045
Медь (Cu ²⁺)		1,0	< 0,0003	—
Нитраты (по NO ₃ ⁻)		45	—	< 0,1
Нитриты (по NO ₂ ⁻)		3	—	< 0,003
Ионы аммония (NH ₄ ⁺)		2	0,193	< 0,005
Свинец (Pb ²⁺)		0,03	< 0,0001	—
Сульфаты (SO ₄ ²⁻)		500	91	96,5
Фториды (F ⁻)		0,7...1,5	0,99	1,08
Хлориды (Cl ⁻)		350	68	56,5
Цинк (Zn ²⁺)		5,0	< 0,001	—
Кальций (Ca ²⁺)		100	90,3	90,4
Магний (Mg ²⁺)		30...50	35,1	29,1
Na ⁺ + K ⁺		—	—	73,4
Щелочность	мг-экв./л	6,5	6,1	6,5
Гидрокарбонаты (HCO ₃ ⁻)	мг/л	—	—	195
Сероводород (H ₂ S)		0,003	—	< 0,002
Органолептические показатели качества воды				
Запах	Баллы	2	—	0
Привкус		2	—	0
Цветность	Градусы	20 (35)*	—	10,7
Мутность по формазину	ЕМФ	2,6 (3,5)* 1,5 (2)*	—	2,73

* Величина, указанная в скобках, может быть установлена по постановлению Главного государственного санитарного врача для соответствующей территории и конкретной системы водоснабжения на основании оценки санитарно-эпидемиологической обстановки в населенном пункте и применяемой технологии водоподготовки.

– неудовлетворительные результаты микробиологического исследования воды из артезианских скважин связаны с недостаточной защищенностью водоносных горизонтов в отдельных районах области, а также с недостатками в техническом обслуживании ВЗУ и санитарно-защитных зон, наличием незатомпированных скважин.

Большинство проблем с некачественной водой в ряде скважин г. Тамбова и Тамбовской области связано не с недостатками проектирования систем водоснабжения, а с несовершенством системы водного менеджмента, не всегда реагирующей вовремя на состояние хозяйственной деятельности на смежных с ВЗУ территориях. В процессе длительной эксплуатации сооружений меняются гидрологические характеристики водосборов, возрастает уровень антропогенной нагрузки, меняется климат, стареет оборудование и т.д. Во внешнем окружении систем водоснабжения (как впрочем, и любых других) спонтанно возникают новые вызовы (возмущения), на которые своевременно должна реагировать система менеджмента. При этом процедура принятия управленческих решений должна учитывать не только узковедомственные интересы «Росводоканала», но и более значимые региональные ЦУР: рост общественного благосостояния, экологическую безопасность, конкурентоспособность экономики, увеличение выпуска продукции и т.п. Совершенно очевидно, что инфраструктурные системы, подобные водоснабжению городов, должны рассматриваться менеджерами в более тесной взаимосвязи с объектами их окружения и с учетом грядущих социально-экономических, политических, технико-технологических и других возможных изменений.

Несмотря на существующее разнообразие конструктивных особенностей схем водоснабжения, принципы их работы в целом идентичны [14]. Это обстоятельство позволяет рассматривать задачи централизованного водоснабжения (ЦВ) на единой научной платформе природо-промышленных систем (ППС) [15].

На рисунке 2 ППС ЦВ представлена в виде двух взаимодействующих подсистем: экологической – $S_{\text{Э}}$ и промышленной – $S_{\text{П}}$, позволяющих индивидуализировать значимость природных и технологических процессов в задачах устойчивого регионального развития. Экологическая подсистема представлена водоносным горизонтом со скважинами и насосной станцией 1-го подъема, тогда как промышленная подсистема включает в себя водоочистное оборудование, установки обеззараживания воды, емкости с чистой водой, насосную станцию 2-го подъема, водоводы и водопроводную сеть.

Символами $X_{\text{П}}$, $X_{\text{Э}}$, $U_{\text{П}}$, $U_{\text{Э}}$ и $Y_{\text{П}}$, $Y_{\text{Э}}$ попарно обозначены множества всех входных, управляемых и выходных переменных в $S_{\text{П}}$ и $S_{\text{Э}}$. Переменные множеств $Z_{Y_{\text{Э}}} \equiv Z_{X_{\text{П}}}$ и $Z_{X_{\text{Э}}} \equiv Z_{Y_{\text{П}}}$ соединяют подсистемы на основе прямой и обратной связи. Работа системы в целом – $S_{\text{ППС}}$, сводится к следующему. На вход $S_{\text{П}}$ поступает задание от диспетчера на водопотребление в виде ежечасного графика расхода воды, которое реализуется насосной станцией 2-го подъема из резервуаров с чистой водой. Для компенсации расхода воды в опустошаемых резервуарах включаются насосы 1-го подъема. Вода из скважин проходит очистку от примесей, обеззараживается

Рис. 2. Централизованное водоснабжение как природа-промышленная система
(условные обозначения: ВЗС – водозаборные скважины)

и заполняет свободные емкости. Весь процесс повторяется непрерывно. Напор, развиваемый насосной станцией 2-го подъема, и высота водонапорной башни (если она необходима) являются конструктивами системы водоснабжения. Они определяются на стадии проектирования с запасом на преодоление потерь напора при движении воды по трубопроводам и при подъеме воды до наивысшей точки ее отбора потребителями.

В процессе нормального функционирования ППС ЦВ задача менеджмента сводится к минимизации расходов на электроэнергию, реагенты, потери давления в сети, вспомогательные операции и т.д. Используя принятые обозначения входных, выходных и внутренних переменных, задачу управления ППС ЦВ на каждом отрезке времени со стабильным расходом воды формализуем следующим образом.

Пусть модель ППС ЦВ описывается системой уравнений вида:

$$\begin{aligned} y_{\Pi} &= F_1(x_{\Pi}, u_{\Pi}, z_{Y_{\Pi}}^A, z_{Y_{\Pi}}^B); & z_{\Pi} &= F_2(x_{\Pi}, u_{\Pi}, z_{Y_{\Pi}}^A, z_{Y_{\Pi}}^B); \\ y_{\Sigma}^A &= \Phi_1(x_{\Sigma}, u_{\Sigma}, z_{Y_{\Pi}}^A, y_{\Sigma}^B); & y_{\Sigma}^B &= \Phi_2(x_{\Sigma}, u_{\Sigma}, z_{Y_{\Pi}}^A, y_{\Sigma}^A); \\ z_{Y_{\Sigma}}^A &= \Phi_3(x_{\Sigma}, u_{\Sigma}, z_{Y_{\Pi}}^A, z_{Y_{\Sigma}}^B); & y_{Y_{\Sigma}}^B &= \Phi_4(x_{\Sigma}, u_{\Sigma}, z_{Y_{\Pi}}^A, z_{Y_{\Sigma}}^A), \end{aligned} \quad (1)$$

где $y_{\Pi} \in Y_{\Pi}$ и $z_{Y_{\Pi}} \in Z_{Y_{\Pi}}$ – соответственно выходные переменные в S_{Π} ; $y_{\Sigma}^A \in Y_{\Sigma}^A$, $y_{\Sigma}^B \in Y_{\Sigma}^B$ и $z_{Y_{\Sigma}}^A \in Z_{Y_{\Sigma}}^A$, $z_{Y_{\Sigma}}^B \in Z_{Y_{\Sigma}}^B$ – соответственно абиотические (A) и биотические (B) выходные переменные в S_{Σ} ; $x_{\Sigma} \in X_{\Sigma}$ и $u_{\Sigma} \in U_{\Sigma}$ – соответственно наблюдаемые и управляемые переменные в S_{Σ} ; $x_{\Pi} \in X_{\Pi}$ и $u_{\Pi} \in U_{\Pi}$ – соответственно наблюдаемые и управляемые переменные в S_{Π} ; $F_1, F_2, \Phi_1 - \Phi_4$ – соответственно функциональные операторы моделей подсистем в S_{Π} и S_{Σ} .

Положим, что $u_{\mathcal{E}}, x_{\mathcal{E}}, u_{\Pi}, x_{\Pi}, y_{\mathcal{E}}^A, y_{\mathcal{E}}^B, y_{\Pi}, z_{\Pi}, z_{Y_{\mathcal{E}}}^A, z_{Y_{\mathcal{E}}}^B$ принадлежат к конечномерным векторным евклидовым пространством $U'_{\mathcal{E}}, X'_{\mathcal{E}}, U'_{\Pi}, X'_{\Pi}, Y_{\mathcal{E}}^A, Y_{\mathcal{E}}^B, Z'_{\Pi}, Z'_{Y_{\Pi}}, Z_{Y_A}^A, Z_{Y_{\mathcal{E}}}^B$ и пусть для любого x_n задана система планово-технологических требований ППС ВЦ, в общем случае имеющая вид:

$$R(x_{\Pi}, y_{\Pi}, u_{\Pi}) \geq 0, \quad (2)$$

$$G(z_{Y_{\Pi}}) \geq 0, \quad (3)$$

где R и G – векторные функции. Формула (2) выражает ограничение на качество и расход воды потребителям и технико-технологические показатели системы водоснабжения, а (3) – задание на забор воды из скважин насосами 1-го подъема.

Будем считать заданной систему ограничений и условий на гидрогеологические показатели $S_{\mathcal{E}}$ в виде

$$H(y_{\mathcal{E}}^A, y_{\mathcal{E}}^B, x_{\mathcal{E}}) \geq 0, \quad (4)$$

где H – векторная функция. В общем случае (4) зависит от входных условий x_{Π} .

Пусть Q – целевая функция (затраты на эксплуатацию), определяемая отображением

$$Q: y_{\Pi} \times u_{\Pi} \times x_{\Pi} \times y_{\mathcal{E}}^A \times y_{\mathcal{E}}^B \times u_{\mathcal{E}} \rightarrow \chi, \quad (5)$$

где χ – множество, в общем случае упорядоченное отношением « $\leq$ »; $\times$ – символ декартова произведения.

Будем полагать, что управляющие воздействия u_{Π} и $u_{\mathcal{E}}$ принадлежат замкнутым областям управления:

$$u_{\Pi} \in U_{\Pi}(x_{\Pi}) \subset U'_{\Pi}; \quad u_{\mathcal{E}} \in U_{\mathcal{E}}(x_{\mathcal{E}}) \subset U'_{\mathcal{E}}, \quad (6)$$

зависящим в общем случае от входных возмущений x_{Π} и $x_{\mathcal{E}}$ соответственно.

Задача оптимального управления ППС ВЦ в статике формулируется следующим образом.

Для заданных x_{Π} и $x_{\mathcal{E}}$ найти такие управляющие воздействия $u_{\Pi}^* \in U_{\Pi}(x_{\Pi}) \subset U'_{\Pi}$ и $u_{\mathcal{E}}^* \in U_{\mathcal{E}}(x_{\mathcal{E}}) \subset U'_{\mathcal{E}}$, при которых выполняются ограничения (2) – (4), условия (1) и для всех $u_{\Pi} \in U_{\Pi}(x_{\Pi})$ и $u_{\mathcal{E}} \in U_{\mathcal{E}}(x_{\mathcal{E}})$, при которых выполняются (1) и (2) – (4):

$$Q(y_{\Pi}^*, u_{\Pi}^*, x_{\mathcal{E}}, y_{\mathcal{E}}^{*A}, y_{\mathcal{E}}^{*B}, u_{\mathcal{E}}^*) \leq Q(y_{\Pi}, u_{\Pi}, x_{\mathcal{E}}, y_{\mathcal{E}}^A, y_{\mathcal{E}}^B, u_{\mathcal{E}}). \quad (7)$$

Поскольку постановка задачи (1) – (7) является детерминированной, ее решение в реальности допустимо на сравнительно малых отрезках времени, например часовых или суточных. На таких отрезках времени состояние ППС ВЦ достаточно предсказуемо. Для проблемы регионально-го устойчивого развития время жизненного цикла оценивается десятилетиями, что порождает множество неопределенностей при принятии управ-

ленческих решений стратегического характера. Вследствие данного обстоятельства необходимо совершенствовать систему водного менеджмента, перенося акцент с решения оперативно-тактических задач управления (хорошо разработанных) на долгосрочно-стратегические.

Новое содержание водного менеджмента

Водный менеджмент (ВМ) представляет собой совокупность научно обоснованных методов планирования, разработки, распределения и оптимального использования водных ресурсов. Его целью сегодня является управление устойчивым развитием водных инфраструктур природного и антропогенного происхождения. К важнейшим задачам ВМ относятся: сохранность и развитие водных ресурсов, поддержание стабильности гидрологического цикла в интересующей местности и использование водосберегающих технологий в жилищно-коммунальном хозяйстве, агропромышленном комплексе, промышленном производстве и других сферах экономики.

В зависимости от специфики решаемых задач возможны три вида ВМ: 1 – водных ресурсов; 2 – водного сервиса; 3 – водного компромисса. Первый из них связан с управлением запасами воды в природных и искусственно созданных системах хранения, распределения и пополнения воды, с контролем ее качества и защитой водных экосистем от загрязнений. Второй вид характерен для рециркуляционных технологических систем – от условной точки с накопленной водой до конечной точки ее потребления в рабочем процессе и последующей очисткой и обезвреживанием перед сбросом в окружающую среду. Третий вид ВМ связан с реализацией политики справедливого распределения воды между различными социально-экономическими группами водопотребителей [7]. В частности, работа систем водоснабжения и водоотведения нуждается в качественном водном сервисе.

Характерной особенностью ВМ в XX столетии стало участие менеджеров в крупных водохозяйственных проектах, связанных с возведением дамб, строительством ГЭС, созданием гидроузлов, систем водоснабжения и водоотведения, гидромелиоративных сетей и т.п. Такие проекты демонстрируют техно-авторитарный стиль управления природопользованием [16], в связи с чем они отнесены к «жесткому инфраструктурному подходу» [17]. В его основу входят проектирование и реализация в регионах структурных изменений, способных вызвать цепные природные реакции, часть которых оказывается экологически, социально и экономически неприемлемыми на длительном отрезке времени, а многообразие природных условий и появление качественно новых вызовов в социальном окружении в итоге снижают эффективность жестких методов управления.

В XXI столетии ВМ характеризуется ростом сложностей ППС, порождаемых увеличением численности населения, расширением сфер экономической деятельности, умножением и ускорением отношений между хозяйствующими субъектами. Вследствие этого результативность работы водных менеджеров сегодня во многом зависит от умения принимать правильные решения в условиях непостоянства гидрологических и климатических характеристик, неопределенности экологических и социальных

ценностей, неожиданного появления новых рисков. В подобных обстоятельствах приходится опираться на механизмы адаптации ВМ к новым вызовам, применяя «мягкие», а правильнее сказать функциональные, способы управления природопользованием, ассоциируемые с переговорными процессами в среде конкурирующих водопользователей, активным участием социальных институтов, с законодательными инициативами, мнениями политических лидеров и т.п.

Сказанное выше не означает полного исключения «жестких» способов управления из практики применения, поскольку благодаря им и создавались водные инфраструктуры. Тогда как «мягкие» подходы к решению проблем свидетельствуют о принципиально новых, а именно гибких возможностях современного менеджмента. Сочетание структурных (жестких) и функциональных (мягких) способов управления легко выстраивается во времени, если развитие водных инфраструктур рассматривать в контексте эволюционного процесса, организуемого по инициативе водных менеджеров [18].

Не менее важной особенностью ВМ в текущем столетии является его комплексность, воспринимаемая как объединение всех имеющих отношение к водным проблемам частей (акторов) в одно гармоничное целое. На этой основе возникло понятие интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР), означающее: «процесс, способствующий скоординированному развитию и управлению водными, земельными и другими, связанными с ними ресурсами, для максимизации социально-экономического благополучия общества на справедливой основе, без компромисса устойчивости жизненно важных экосистем» (формулировка Глобального водного партнерства). Смысл ИУВР заключается в расширении круга заинтересованных сторон (политиков, экономистов, экологов, земледельцев, инженеров и представителей общественности) в решении конкретных задач в целях получения дополнительной выгоды. Это может означать пересмотр первоначально выбранных границ ППС в направлении охвата большого числа подсистем. Одна из задач ИУВР заключается в гармонизации процесса экономического развития с сохранностью экосистем, фактически означающая управление промышленными и экологическими подсистемами в формате ППС.

Еще одна важная особенность ВМ связана с необходимостью принятия решений в условиях неопределенности из-за недостаточной информации о состоянии водных источников и экосистем, отсутствия сведений о планах развития водопользователей и климатических изменениях, о возрастании нагрузки на экосистемы и т.п. В таких условиях невозможно применять традиционные методы управления, основанные на историческом опыте и архивных данных, а приходится анализировать возможные сценарии развития водных ресурсов, прогнозировать последствия принимаемых решений и оценивать риски. В итоге, менеджеры приходят к пониманию необходимости разработки адаптивного метода управления, способного своевременно преодолевать возникающие трудности на основе «принципа предосторожности».

Заключение

Перечисленные особенности ВМ, возникающие на современном этапе научно-технического прогресса и связанные с проблемой устойчивого развития водных инфраструктур в субъектах РФ, указывают на необходимость применения адекватного научного подхода и инструментария, способствующих обоснованному принятию управленческих решений на этапах проектирования и эксплуатации водохозяйственных систем в условиях социально-экономических и экологических неопределенностей. Сущностью подхода может стать создание проблемно-ориентированной информационно-аналитической системы поддержки и принятия решений, использующей ГИС-технологии, системы мониторинга, имитационного моделирования, анализа альтернатив, оценки рисков и методы искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Вернадский, В. И. История природных вод / В. И. Вернадский ; отв. ред. С. Л. Шварцев, Ф.Т. Яншина. – М. : Наука, 2003. – 750 с.
2. Water and Jobs // The United Nations World Water Development Report / UNESCO. – Paris, 2016. – 158 p.
3. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И. А. Шикломанова. – СПб. : Государственный гидрологический институт, 2008. – 600 с.
4. Резолюции 47-й сессии (1992–1993 годы) Генеральной Ассамблеи ООН. – Текст : электронный // Организация Объединенных Наций. – URL : <https://www.un.org/ru/ga/47/docs/47res.shtml> (дата обращения: 19.10.2021).
5. Резолюции 71-й сессии (2016–2017 годы) Генеральной Ассамблеи ООН. – Текст : электронный // Организация Объединенных Наций. – URL : <https://www.un.org/ru/ga/71/docs/71res3.shtml> (дата обращения: 19.10.2021).
6. Groundwater in Our Water Cycle – Getting to Know Earth's Most Important Fresh Water Source / E. Poeter, Y. Fan, J. Cherry [et al.]. – Guelph, Ontario, Canada, 2020. – 136 p.
7. О недрах : Закон РФ от 21.02.1992 г. № 2395-1. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/ (дата обращения: 19.10.2021).
8. Report of the United Nations Conference on Environment and Development. – Текст : электронный // The United Nations Conference on Environment and Development, 3 – 14 June 1992, Rio de Janeiro. – UN General Assembly, 12 August 1992. – Conf. 151/26. – Vol. 1. – URL : https://mirror.unhabitat.org/downloads/docs/RIO_DECLARATION_ON_ENVIRONMENT_AND_DEVELOPMENT.pdf (дата обращения: 19.10.2021).
9. Stewart, I. G., Groundwater Contamination Science and the Precautionary Principle / I. G. Stewart, J. Cherry, M. Harding // Advances in Geoethics and Groundwater Management: Theory and Practice for a Sustainable Development, Proceedings of the 1st Congress on Geoethics and Groundwater Management (GEOETH&GWM'20), 2020, Porto, Portugal. – Springer, 2020. – P. 17 – 21.
10. Прогноз изменения гидрогеологических условий под влиянием водохозяйственных мероприятий / И. К. Невечеря, Н. И. Зеленцова, Л. Г. Померанцева [и др.]. – М. : Недра, 1987. – 205 с.
11. Крайнов, С. Р. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения / С. Р. Крайнов, В. М. Швец. – М. : Недра, 1987. – 237 с.

12. Сомов, М. А. Водоснабжение : в 2 т. Т. 1 Системы забора, подачи и распределения воды : учеб. для вузов / М. А. Сомов, М. Г. Журба ; под ред. М. А. Сомова. – М. : АСВ, 2010. – 262 с.
13. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Тамбовской области в 2019 году / Администрация Тамбовской области ; Управление по охране окружающей среды и природопользованию Тамбовской области. – Тамбов, 2020. – 191 с.
14. Журба, М. Г. Водоснабжение : в 2 т. Т. 2 Улучшение качества воды : учеб. для вузов / М. Г. Журба, Ж. М. Говорова. – М. : АСВ, 2010. – 544 с.
15. Попов, Н. С. Разработка системного подхода к решению региональных задач устойчивого развития / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, Л. Н. Чуксина // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 400 – 423. doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.400-423
16. Реймерс, Н. Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы) / Н. Ф. Реймерс. – М. : Журн. «Россия молодая», 1994. – 367 с.
17. Managing Water under Uncertainty and Risk // The United Nations World Water Development / UNESCO. – Paris, 2012. – Report 4, Vol. 1. – 407 p.
18. Попов, Н. С. О некоторых особенностях в постановке и решении региональных задач устойчивого развития. Часть II / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, А. А. Чуксин // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2020. – № 3 (77). – С. 40 – 55. doi: 10.17277/voprosy.2020.03.pp.040-055

References

1. Vernadskiy V.I., Shvartsev S.L., Yanshina F.T. [Eds.] *Istoriya prirodnikh vod* [History of natural waters], Moscow: Nauka, 2003, 750 p. (In Russ.)
2. The United Nations World Water Development Report, Paris, 2016, 158 p.
3. Shiklomanov I.A. [Ed.] *Vodnyye resursy Rossii i ikh ispol'zovaniye* [Water resources of Russia and their use], St. Petersburg: Gosudarstvennyy gidrologicheskiy institut, 2008, 600 p. (In Russ.)
4. <https://www.un.org/ru/ga/47/docs/47res.shtml> (accessed 19 October 2021).
5. <https://www.un.org/ru/ga/71/docs/71res3.shtml> (accessed 19 October 2021).
6. Poeter E., Fan Y., Cherry J. [et al.] *Groundwater in Our Water Cycle - Getting to Know Earth's Most Important Fresh Water Source*, Guelph, Ontario, Canada, 2020, 136 p.
7. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/ (accessed 19 October 2021).
8. https://mirror.unhabitat.org/downloads/docs/RIO_DECLARATION_ON_ENVIRONMENT_AND_DEVELOPMENT.pdf (accessed 19 October 2021).
9. Stewart I.G., Cherry J., Harding M. *Advances in Geoethics and Groundwater Management: Theory and Practice for a Sustainable Development*, Proceedings of the 1st Congress on Geoethics and Groundwater Management (GEOETH&GWM'20), 2020, Porto, Portugal, Springer, 2020, pp. 17-21.
10. Nevecherya I.K., Zelentsova N.I., Pomerantseva L.G. [et al.] *Prognoz izmeneniya gidrogeologicheskikh usloviy pod vliyaniyem vodokhozyaystvennykh meropriyatiy* [Forecast of changes in hydrogeological conditions under the influence of water management measures], Moscow: Nedra, 1987, 205 p. (In Russ.)
11. Kraynov S.R., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod khozyaystvenno-pit'yevogo naznacheniya* [Geochemistry of groundwater for household and drinking purposes], Moscow: Nedra, 1987, 237 p. (In Russ.)
12. Somov M.A. [Ed.], Zhurba M.G. *Vodosnabzheniye: v 2 t. T. 1 Sistemy zabora, podachi i raspredeleniya vody: uchebnik dlya vuzov* [Water supply: in 2 volumes. Vol. 1 Systems of intake, supply and distribution of water: textbook for universities], Moscow: ASV, 2010, 262 p. (In Russ.)

13. *Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Tambovskoy oblasti v 2019 godu* [Report on the state and protection of the environment of the Tambov region in 2019], Tambov, 2020, 191 p. (In Russ.)
14. Zhurba M.G., Govorova Zh.M. *Vodosnabzheniye: v 2 t. T. 2 Uluchsheniye kachestva vody: uchebnik dlya vuzov* [Water supply: in 2 volumes. Vol. 2 Improving water quality: a textbook for universities], Moscow: ASV, 2010, 544 p. (In Russ.)
15. Popov N.S., Peshcherova O.V., Chuksina L.N. [Development of a systematic approach to solving regional problems of sustainable development], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 3, pp. 400-423, doi: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.400-423 (In Russ., abstract in Eng.)
16. Reymers N.F. *Ekologiya (teorii, zakony, pravila, printsipy i gipotezy)* [Ecology (theories, laws, rules, principles and hypotheses)], Moscow: Zhurnal "Rossiya molodaya", 1994, 367 p. (In Russ.)
17. The United Nations World Water Development, Paris, 2012, report 4, vol. 1, 407 p.
18. Popov N.S., Peshcherova O.V., Chuksin A.A. [On some features in the formulation and solution of regional problems of sustainable development. Part II], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2020, no. 3 (77), pp. 40-55, doi: 10.17277/voprosy.2020.03.pp.040-055 (In Russ., abstract in Eng.)
-

Water Management in Regional Sustainable Development

A. A. Balamutova, N. S. Popov

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Keywords: water management; information and analytical systems; groundwater; making decisions; nature-pre-industrial systems; sustainable development.

Abstract: In recent decades, human activities have increasingly influenced hydrological systems. The concept of sustainable development of water infrastructures in the constituent entities of the Russian Federation is an important basis for their use in the interests of present and future generations of people. The modern features of water management are considered, an example of water supply in the city of Tambov is given, a conclusion is made about the need to create a problem-oriented information and analytical system for support and decision-making in the face of uncertainties of future socio-economic and environmental challenges.

© А. А. Баламутова, Н. С. Попов, 2021