ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2022, том 49, № 4, с. 407–422

ПРОБЛЕМЫ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ АРИДНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 556.18:626/62

АНАЛИЗ НАПОЛНЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ ЕСТЕСТВЕННОГО СТОКА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ И ГОРОДА СЕВАСТОПОЛЯ

© 2022 г. И. В. Николенко[a], *, А. М. Копачевский[b], Э. А. Каримов[c]

[a] *Институт "Академия строительства и архитектуры" КФУ им. В.И. Вернадского", Симферополь, 295493 Россия*

[b] *Научно-производственная фирма "Водные технологии", Симферополь, 295000 Россия*

[c] *Симферопольский филиал "Крыммелиоводхоз", Симферополь, 295007 Россия*

**e-mail: nikoshi@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.
После доработки 18.01.2022 г.
Принята к публикации 21.01.2022 г.

Выполнен анализ наполнения водохранилищ естественного стока Республики Крым и г. Севастополя. Обоснован комплекс мероприятий по решению проблем обеспечения водной безопасности на основе детального анализа многовекового опыта водопользования п-ова Крым, внедрения современных тенденций применения интегральных схем совмещения экстенсивных и интенсивных методов решения проблем дефицита водных ресурсов с внедрением принципов водосбережения и водоэффективности. Представлена оценка неравномерности распределения осадков по временам года и по зонам п-ова Крым, что является одной из основных причин водного дефицита. Рассмотрены вопросы более полного использования водотоков в период весенних и летних паводков многоводных лет путем увеличения суммарного полезного объема водохранилищ естественного стока Крыма. Показана эффективность применения интенсивных методов водопользования в процессах снижения и устранения водного дефицита в различных странах. Обоснованы пути решения проблем обеспечения водной безопасности Крыма с применением интенсивных методов водопользования.

Ключевые слова: полуостров Крым, водные ресурсы, дефицит, водохранилище, естественный сток, объем наполнения, местные источники, водосбережение, водоэффективность.

DOI: 10.31857/S0321059622040150

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с положениями Водной стратегии Российской Федерации, одни из основных задач, определяющих направления развития водохозяйственного комплекса, – повышение рациональности использования водных ресурсов, а также ликвидация их локальных дефицитов. Крымский п-ов в 2020 г. столкнулся с серьезной проблемой нехватки пресной, в том числе и питьевой, воды. Была переведена на график подачи воды часть населенных пунктов, включая столицу Республики Крым – Симферополь, города Ялту, Алушту, а также более 20 малых населенных пунктов. В некоторых городах по причине дефицита была прекращена централизованная подача горячей воды.

К объективным факторам возникновения дефицита водных ресурсов на полуострове, кроме перекрытия Северо-Крымского канала в 2014 г., относят цикличные изменения режима атмосферных осадков, глобальные изменения климата, повышенное испарение с открытых поверхностей водных объектов из-за высокой температуры и высокого ветрового воздействия в летние месяцы, нерациональное использование водных ресурсов, в том числе применение водоемких технологий в сельскохозяйственном производстве, а также недостаток комплексных и системных мероприятий по водосбережению и водоэффективности. Большое влияние оказывает техническое состояние сооружений, оборудования, сетей систем водоснабжения и водоотведения, поддержание которого долгие годы недостаточно финан-

сировалось, а также недостаточно продуманное использование водных ресурсов всех видов (в том числе очищенных сточных вод и образующихся осадков) в разных отраслях, проектные решения, недостаток научно-исследовательских работ как фундаментального, так и прикладного характера по направлениям преодоления вододефицита.

Есть субъективные факторы возникновения дефицита водных ресурсов на Крымском п-ове. Среди них – отсутствие системы управления общественными, экономико-хозяйственными и социальными взаимоотношениями с учетом интегрированного трехуровневого водного баланса для п-ова Крым, всех источников водных ресурсов и их потребителей для позитивных, негативных и наиболее вероятных прогнозируемых условий. Огромны потери водных ресурсов в водообильные годы путем стока в море пресной воды поверхностного стока, сброс очищенных сточных вод без их повторного использования для сельскохозяйственных и технических целей, потери в системах водоснабжения, связанные с конструктивными, технологическими и эксплуатационными причинами, отсутствие разработок долгосрочных и сверхдолгосрочных стратегий внедрения рециклинга воды для сельскохозяйственных, промышленных и рекреационных предприятий. Негативно влияет на ситуацию отсутствие финансирования научно-исследовательских, поисковых и опытно-конструкторских работ по обоснованию и решению региональных проблем дефицита водных ресурсов, обеспечивающих разработку современных подходов и механизмов нормативно-правового, технического, технологического и информационного обеспечения развития водохозяйственного комплекса для обеспечения водной и водно-экологической безопасности Крыма. Немаловажная проблема не только сегодня, но и для будущего развития водохозяйственного комплекса Крыма – дефицит специалистов и их подготовки для решения проблем локального дефицита водных ресурсов – гидроинформатике и акватронике.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

История водопользования на Крымском полуострове насчитывает несколько тысячелетий, что подтверждается наличием разных артефактов времен тавров, киммерийцев, скифских городищ, древнегреческих античных приморских городов (с V века до н. э.), колоний Римской и Византийской империй, хазарских, половецких поселений, генуэзских колоний, поселений времен Золотой Орды (с XV в.) с системами сбора и подачи воды в городах Крымского ханства, системами водоснабжения крымских городов Российской империи (с конца XVIII в.), Советского Союза (XX в.), Украины и Российской Федерации. На Крымском п-ове более двух с половиной тысяч лет уникальное географическое положение на перекрестке морских транзитных путей, уникальные климатические и природные условия, богатые растительный и животный мир, большое количество полезных ископаемых позволяли племенам и народам развивать сельское хозяйство, промышленность и торговлю. Без наличия достаточных объемов водных ресурсов и культуры водопользования в Крыму его историческое развитие было бы невозможным.

Несмотря на большое разнообразие водных ресурсов, пресная вода в Крыму всегда имела важное значение, так как на полуострове нет крупных пресных озер и полноводных рек, а более 1600 малых рек и временных водотоков распределены крайне неравномерно, имеют стоки с большими сезонными и годовыми перепадами, запасы подземных пресных вод также распределены по территории неравномерно, а также различаются по степени пригодности их использования. Естественны для климата Крыма периодическое чередование водообильных лет с паводками на малых реках и вододефицитных лет с засухой разной интенсивности. Для водотоков Крыма характерны обильные паводки, но при этом многие балки полностью пересыхают в межень. Поэтому у всех народов, населявших этот край в разные исторические эпохи, существовало трепетное отношение к источникам пресной воды, а культура и рациональное водопользование было важным элементом общей культуры.

Грандиозные изменения в схеме водопользования Крыма произошли в конце XX в. после строительства Северо-Крымского канала (СКК), его трех очередей с ответвлениями. Первым автором идеи создания канала для использования днепровской воды для орошения крымских земель в 1833 г. был действительный статский советник, инспектор южнороссийского сельского хозяйства Х.Х. Стевен, основатель и директор Никитского ботанического сада. Идею канала в 1846 г. поддержал академик П.И. Кеппен, научная деятельность которого была посвящена самым разнообразным отраслям естествознания России, что позволило ему стать одним из соучредителей Русского географического общества. Начало строительства канала планировалось в 1916 и 1935 гг., но планы срывались революциями и войнами. Проект СКК был утвержден в СССР только в 1950 г. как составная часть сталинского стратегического плана преобразования природы. Строительство всех гидротехнических объектов СКК длилось 36 лет с 1961 по 1997 г. По длине СКК стал самым протяженным рукотворным каналом в Европе. В результате более 50 лет проблемы с водными ресурсами Крымского полуострова решались за счет днепровской воды, поступающей по СКК. До 2014 г. СКК обеспечивал полуострову

≥1.5 млрд м^3 пресной воды, что составляла 70–85% всего объема ее потребления. При этом общие транспортные потери на испарение и фильтрацию в подземные водоносные горизонты составляли до 50%, а основная часть воды (до 80%) шла на нужды сельского хозяйства, в том числе большая часть (60%) на выращивание риса, наиболее влагоемкой сельскохозяйственной культуры. Фильтрация воды из русла СКК достигала 40% и была одной из основных причин подтопления территорий, вторичного засоления почв и смены биоценозов вдоль канала. СКК показал низкую эффективность по техническим, экономическим и экологическим показателям [3, 4]. Решение проблем водообеспечения Крыма за счет эксплуатации СКК негативно повлияло на водную этику, бережное отношение к воде, желание и умение рационально ее использовать. После распада СССР произошли разрушительные изменения в хозяйственной деятельности полуострова: в сельском хозяйстве исчезли колхозы и совхозы, взамен появились другие агропромышленные структуры, в рыночную экономику не смогли войти большая часть промышленных предприятий, большая часть государственных рекреационных предприятий превратились в корпоративные и частные компании. Эти изменения в хозяйственной деятельности влияют на потребление водных ресурсов и отношение к ним.

Дефицит водных ресурсов – глобальная мировая проблема. В большинстве исследований по проблемам водопользования констатируется, что в настоящее время ≥40% населения мира живет в районах, испытывающих среднюю или острую нехватку воды [1, 2]. Несмотря на то, что вода – только часть глобальной системы природопользования, в ней основное влияние имеют локальные системы управления, т. е. то, как водные ресурсы используются и управляются на местном и региональном уровне [1, 15]. Эффективный способ выхода из замкнутого круга водного дефицита – повышение эффективности водопользования и водосбережение, которые в современном глобальном мире должны стать основными вариантами решения проблемы дефицита воды. Как пишет С. Постел в [15], с помощью современных технологий и методов, которые применяются и доступны сегодня, сельское хозяйство может сократить свои потребности в воде на 10–50, промышленность – на 40–90, а города – до 30% без ущерба для экономики и качества жизни.

Структура водопользования, ее идеология и водная этика, которая в течение последних десятилетий строилась на основе использования СКК, сохраняется на Крымском п-ове и требует существенного изменения с учетом исторической памяти отношения к водным ресурсам, а также современных технологий и методов.

Поиск методов решения задач обеспечения водной и водно-экологической безопасности Крымского п-ова должен основываться на применении исторического опыта, а также современных подходов к водопользованию в вододефицитных регионах с учетом водной этики, научной обоснованности водохозяйственных решений и принципов интегрированного управления с ориентацией на собственные водные ресурсы региона. Поэтому в данной работе выполнен анализ наполнения водохранилищ естественного стока как основных источников водных ресурсов, рассмотрены пути решения проблем обеспечения водной безопасности Республики Крым и г. Севастополя.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Крым относится к числу наиболее вододефицитных регионов Российской Федерации. Водные ресурсы по территории Крыма распределены крайне неравномерно, что объясняется различными, в том числе сложными, формами рельефа, высотной поясностью Крымских гор, разнообразием климатических зон, сочетанием южного географического положения полуострова и влиянием моря и заливов. Распределение осадков неравномерно как по временам года, так и по регионам полуострова. По данным Государственного комитета по водному хозяйству Республики Крым построена схема распределения среднего количества осадков по территории Крымского п-ова (рис. 1). Из анализа приведенной схемы следует, что в связи со сложным рельефом, особенностями климатических зон средние осадки распределяются неравномерно: от минимальных – 250–300 мм в степных районах, 600–800 мм – в южнобережной и горной зонах, 800–1000 мм – в горной зоне до >1000 мм в зоне горы Ай-Петри. Большинство районов Крыма, особенно западное и восточное морское побережье, относится к зоне недостаточного увлажнения. Большая часть степных районов Крыма относится к зоне относительно недостаточного увлажнения.

Распределение сезонных осадков по зонам п-ова Крым также крайне неравномерно. На рис. 2 показаны диаграммы среднемесячных осадков по данным с метеорологических станций Крымского УГМС Ай-Петри, Симферополя и Керчи. Анализ представленных на рис. 2 диаграмм показал, что несмотря на относительно небольшие расстояния между рассмотренными пунктами, структура месячных осадков относительно разнообразна по климатическим зонам Крыма. В южнобережной и горной зонах максимальные осадки наблюдаются в зимние месяцы – в 1.5–2 раза больше, чем в летние месяцы. В степной зоне максимальные осадки наблюдаются в летние месяцы –

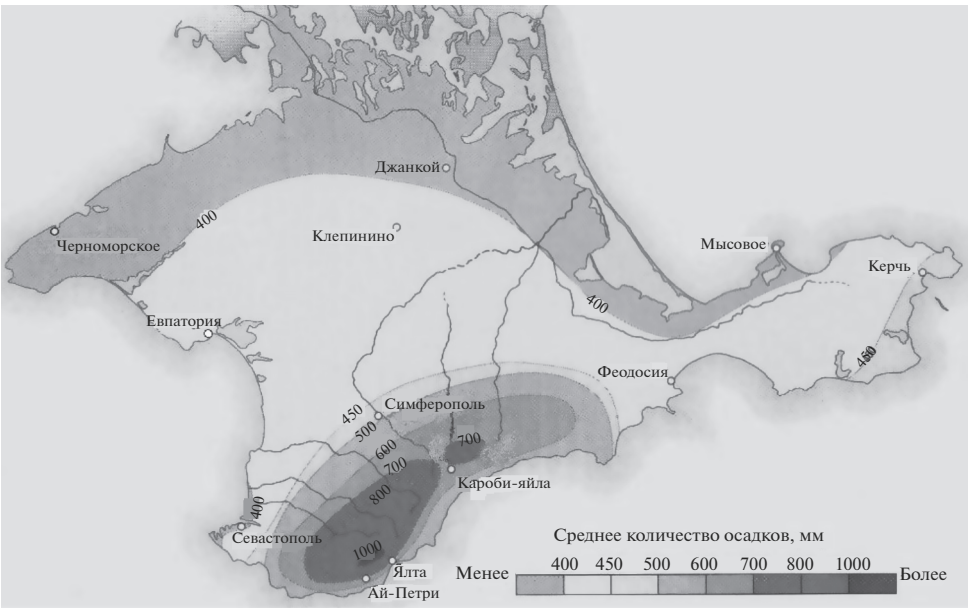

Рис. 1. Картосхема территории распределения средних осадков в Крыму в мм.

в 1.3–1.7 раза больше, чем в зимние месяцы. Кроме неравномерного распределения осадков по временам года, для Крымского п-ова характерно и неравномерное распределение режима водопотребления, что связано с сезонным увеличением численности населения в летние месяцы и обусловливает максимум водопотребления в этот период.

На территории Крымского п-ова выделяют 1657 постоянных и временных водотоков, в том числе 150 рек, а также ручьев и балок общей длиной до 6 тысяч км [12]. Гидрографическая сеть Крымского п-ова неравномерная и подразделяется на равнинную и горную части. В горной части Крыма формируется большинство рек полуострова с развитой речной сетью. На равнинной части речная сеть редкая, а многие водотоки наполняются водой только в половодье, некоторые из которых имеют временные водотоки.

Для рек Крыма характерно смешанное питание с преобладанием дождевого, для рек степной части – снегового. Реки Крыма относятся к особой категории рек с паводочным режимом крымского подтипа: паводки здесь наблюдаются преимущественно в зимне-весенний период с ноября по апрель, дающий до 80% поверхностного стока; летне-осенний меженный период – с мая по октябрь, прерываемый интенсивными кратковременными дождевыми паводками; большинство водотоков в межень пересыхает. Основные реки Крыма следующие: Салгир, Кача, Альма, Бельбек, Индол, Биюк-Карасу, Чёрная, Бурульча [12]. Самая длинная – р. Салгир (220 км), а самая полноводная – р. Бельбек. Несмотря на большое число водных объектов, по среднемноголетнему речному стоку Республика Крым занимает одно из последних мест среди регионов России.

В связи с ярко выраженной территориальной и сезонной неравномерностью осадков и речного стока – одного из основных источников пресной воды – для ее сезонного накопления и дальнейшего использования на территории Крымского п-ова сооружено 15 водохранилищ естественного стока общим полным объемом до 253.0 млн м^3. Все крымские водохранилища естественного стока построены во времена СССР, четыре – в предвоенные годы. Самым крупным водохранилищем естественного стока в Крыму стало Чернореченское после реконструкции в 1984 г. в результате наращивания плотины с увеличением его полного объема до 64.2 млн м^3. Реки, питающие водохранилища естественного стока, имеют истоки в основном в Крымских горах.

Для решения задач водообеспечения Крыма за счет эксплуатации СКК построено 9 наливных водохранилищ системы СКК общим полным объемом до 145 млн м^3 и 1922 пруда общим объемом 216 млн м^3. Для водоснабжения расположенных там городов и поселков наливные водохранилища расположены преимущественно в Восточном Крыму на Керченском п-ове, а также в равнинном Крыму, за исключением Межгорного и Старо-Крымского водохранилищ, относящихся к зоне Предгорья Крымских гор.

На рис. 3 показан годовой приток в водохранилища Крыма с 1983 по 2020 г. по данным Государственного комитета по водному хозяйству и мелиорации Республики Крым. Средний приток

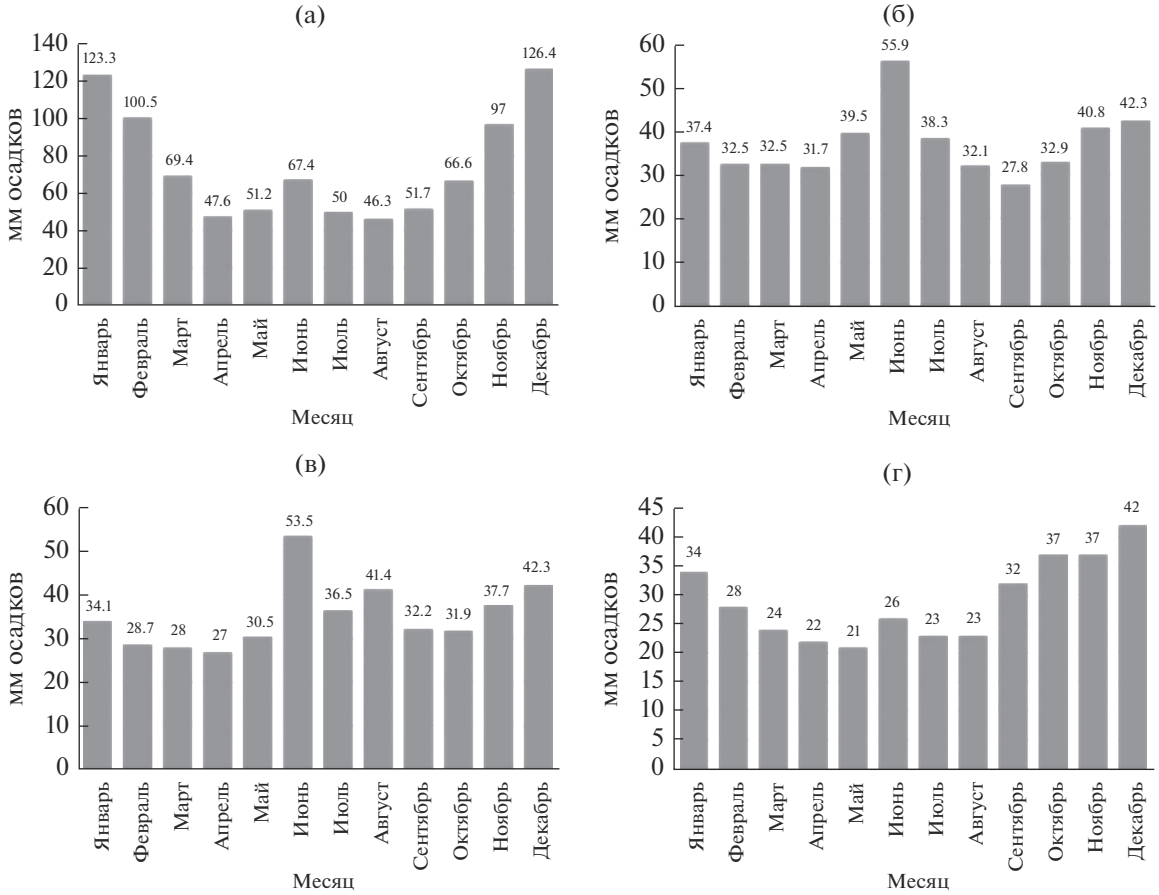

Рис. 2. Диаграммы средних многолетних месячных сумм осадков: а – Ай-Петри, б – Симферополь, в – Керчь, г – Севастополь.

за этот период в водохранилища естественного стока составил 270 млн м^3, а средний приток в наливные водохранилища СКК за период с 1989 по 2013 г. – 140 млн м^3. Расчетный период был выбран с учетом функционирования всех наливных водохранилищ, в том числе Межгорного с полным объемом 50 млн м^3. После перекрытия СКК в 2014 г. наливные водохранилища Восточного Крыма наполнялись за счет подачи в канал подземных вод из трех групповых водозаборов (Просторненского, Нежинского и Новогригорьевского) в северо-восточной части Крымского п-ова, а также ввода в действие гидротехнического сооружения по переброске в СКК части стока р. Биюк-Карасу.

Анализ представленного на рис. 3 годового притока в водохранилища естественного стока Крыма показал, что они могут отличаться более чем в 6 раз. Максимальный приток за рассмотренные 38 лет – 628 млн м^3 (1997 г.), а минимальный приток – 97 млн м^3 (1994 г.). Эти экстремальные значения соответственно в 2.3 раза больше среднего притока за рассмотренный период и в 2.8 раза меньше среднего. Приток в водохранилища естественного стока величиной, в 1.4–1.6 раза большей, чем средняя, наблюдается с периодичностью 5–7 лет. Приток в наливные водохранилища СКК в период с 1989 по 1999 г. имел величину выше средней, в том числе приток 1993 г., который был в 1.5 раза выше среднего. В период с 2005 по 2013 г. приток в наливные водохранилища СКК был меньше среднего за рассмотренный период. В период после перекрытия СКК наливные водохранилища Восточного Крыма служат для аккумулирования вод подземных водозаборов и части стока р. Биюк-Карасу с величиной годовых притоков 38–56 млн м^3.

Цикличные изменения сумм атмосферных осадков в 2020 г. на Крымском п-ове вызвали аномально малый приток в наливные водохранилища, что привело к серьезным проблемам нехватки пресной, в том числе и питьевой, воды. Существенным фактором возникновения дефицита водных ресурсов на полуострове в этот период стало перекрытие СКК в 2014 г., так как не стало резервных запасов водных ресурсов в налив-

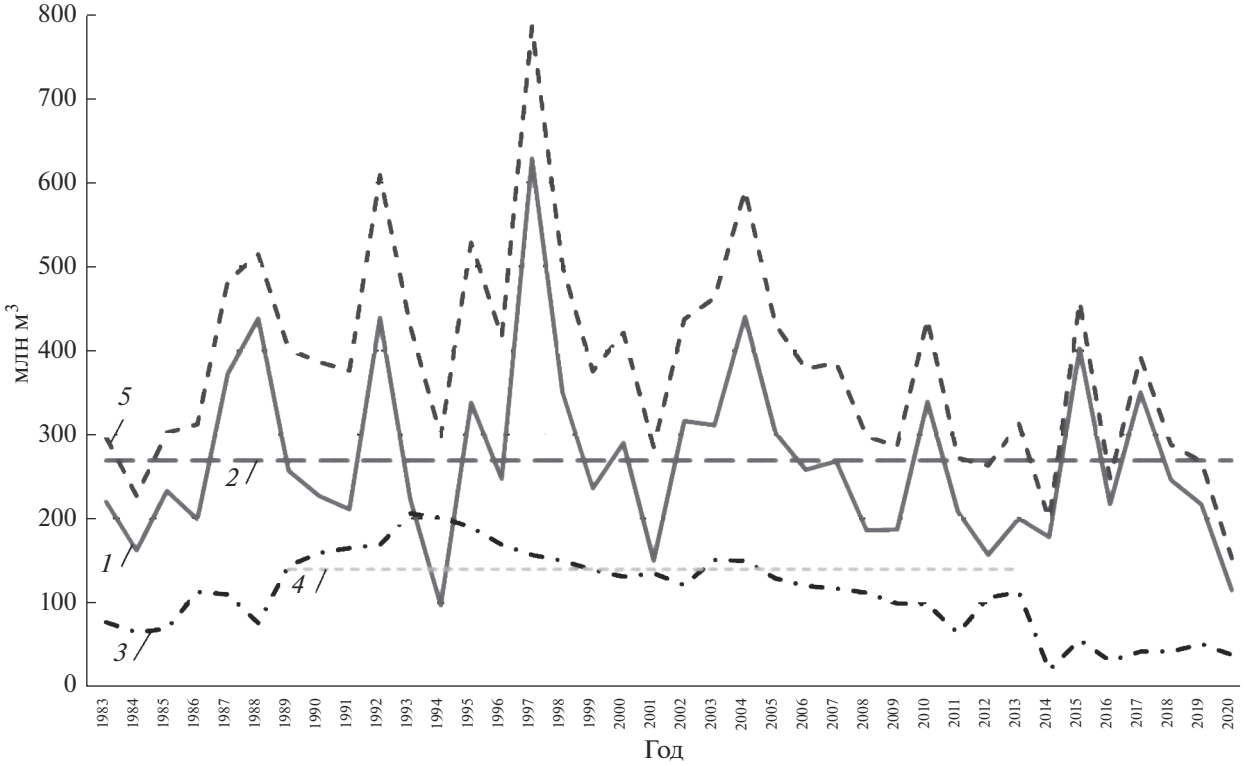

Рис. 3. Годовой приток (млн м^3) в водохранилища Крыма за 1983–2020 гг.: *1* – суммарный приток в водохранилища естественного стока, *2* – средний суммарный приток в водохранилища естественного стока, *3* – приток в водохранилища СКК, *4* – средний приток в водохранилища СКК, *5* – суммарный приток в водохранилища естественного стока и СКК.

ных водохранилищах СКК, которые могли стать дополнительным источником пресной воды [7].

Для анализа аккумулированной воды в водохранилищах естественного стока Крыма в 2021 г. рассмотрим суточный ход объема наполнения водохранилищ естественного стока на рис. 4, который построен по суточным данным Крыммелиоводхоза за январь–октябрь: максимального (max), среднего (ср) и минимального (min) стока в течении 34 лет (1987–2021 гг.), а также объемы наполнения в 2020 и 2021 гг.

На графиках рис. 4 показан суточный ход максимального, среднего и минимального наполнения водохранилищ естественного стока за многолетний период с 1987 г. При построении выбирались значения за характерные 3 дня недели. Максимальные значения наполнения водохранилищ естественного стока соответствует 1997 г. – самому многоводному году по осадкам за рассмотренный период наблюдений. Большая часть временнóго хода минимального наполнения соответствует 1994 г. – самому маловодному году по осадкам за рассмотренный период наблюдений. Из анализа представленного на рис. 4 временнóго хода следует, что в конце не самого маловодного 2020 г. наполнение водохранилищ естественного стока стало меньше многолетних минимальных значений. Фактическое наполнение водохранилищ естественного стока Крыма перешло минимальный многолетний уровень в первой декаде марта 2021 г., а уровень наполнения предыдущего 2020 г. – в середине июня. С середины сентября 2021 г. уровень наполнения водохранилищ достиг 90–94% от среднего многолетнего наполнения. Анализ наполнения водохранилищ естественного стока Крыма за рассмотренный многолетний период показал, что отношение средних уровней наполнения к минимальным – 3.0–5.6, причем меньшие значения соответствуют летним месяцам, а большие – зимним. Отношение максимальных уровней наполнения к средним составляет 1.3–1.9, причем меньшие значения соответствуют летним месяцам, а большие – зимним. Из анализа представленных данных по наполнению водохранилищ естественного стока Крыма за многолетний период следует, что максимальный объем наполнения этих водохранилищ занижен. В частности, в июне многоводного 2015 г. из Симферопольского водохранилища было сброшено паводковых вод в объеме 9.9, Партизанского – 11.1 и Загорского – 9.9 млн м^3.

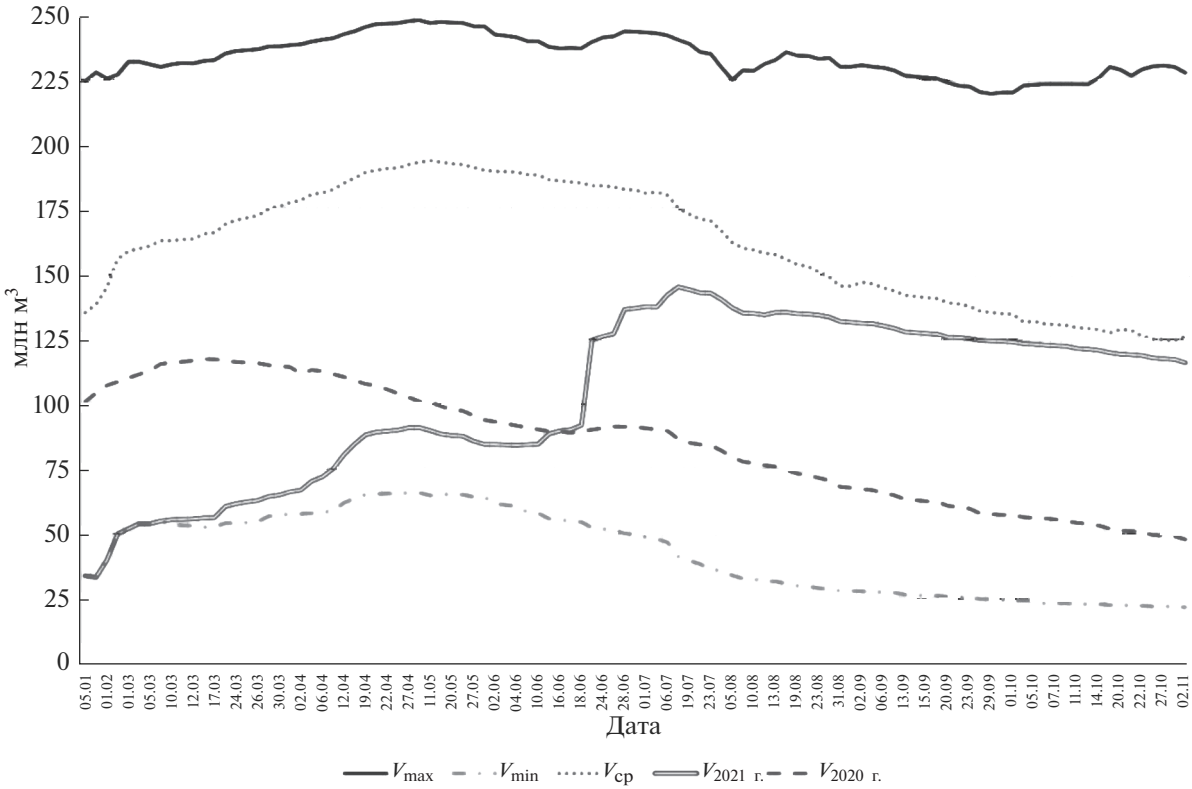

Рис. 4. Временно́й ход наполнения V водохранилищ естественного стока Крымского п-ова.

Основные источники водоснабжения населения Крыма – водохранилища естественного стока. Поэтому степень их наполнения во многом определяет социально-экономические условия на полуострове. Необходимость увеличения суммарного полного проектного объема водохранилищ естественного стока Крыма качественно подтверждается следующими факторами:

существенное различие суммарных осадков в мало- и многоводные годы – в 2.5–6 раз, а число мало- и многоводных лет за рассмотренный период одинаково;

современные данные по гидрологии рек Крыма показывают, что суммарный полный проектный объем водохранилищ естественного стока составляет 25–27% среднемноголетнего стока рек, которые их наполняют;

срок эксплуатации действующих водохранилищ естественного стока Крыма составляет от 40 до 80 лет, что не позволяет по их техническому состоянию обеспечить использование полного проектного объема;

суммарный мертвый объем водохранилищ естественного стока составляет 25 млн м^3;

большие сбросы воды из водохранилищ естественного стока в многоводные годы, они уходят с водами рек в море.

Для количественной оценки суммарного полного проектного объема водохранилищ естественного стока Крыма рассмотрены суточные минимальные, максимальные и средние многолетние объемы наполнения за последние 35 лет. Для выполнения такой оценки рассмотрим средние суточные объемы наполнения водохранилищ:

$$W_{\text{ср}\,i} = (W^*_{\max i} + W_{\min i})\big/2, \qquad (1)$$

$W^*_{\max i}$ – максимальные суточные объемы наполнения водохранилищ при отсутствии сброса из них; $W_{\min\,i}$ – минимальные суточные объемы наполнения водохранилищ.

Многолетние суточные величины $W_{\text{ср}\,i}$ и $W_{\min\,i}$ известны из данных Крыммелиоводхоза. По формуле (1) выполним оценку расчетной величины максимальных суточных объемов наполнения водохранилищ при отсутствии сброса из них по зависимости:

$$W_{\max\,\text{расч}\,i} = 2W_{\text{ср}\,i} - W_{\min i}, \qquad (2)$$

где $W_{\text{ср}\,i}$ – средние многолетние суточные величины наполнения водохранилищ естественного стока, $W_{\min\,i}$ – многолетние минимальные суточные величины наполнения.

По зависимости (2) определим расчетные суточные максимальные объемы наполнения водо-

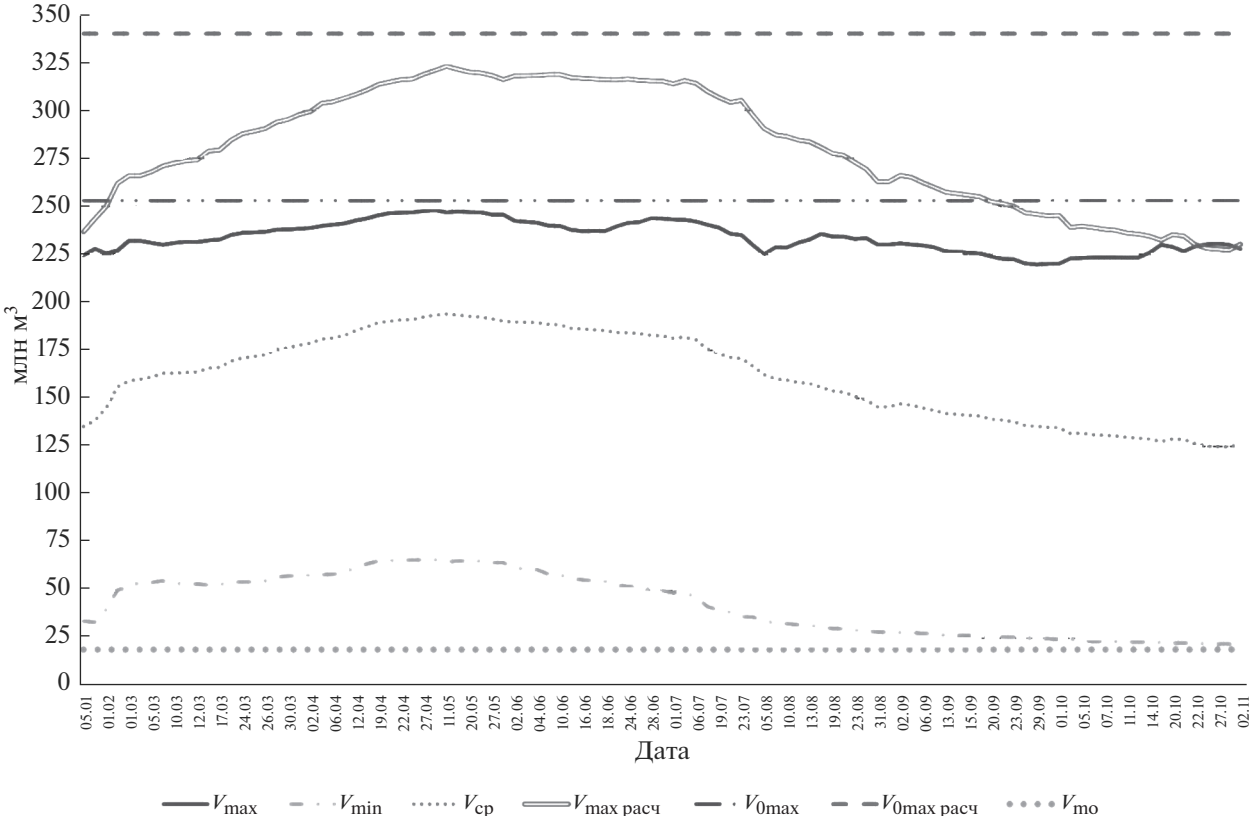

Рис. 5. Временнóй ход расчетного суммарного суточного максимального объема наполнения водохранилищ естественного стока по результатам анализа многолетнего среднего и минимального объемов наполнения. V_{max} – многолетний максимальный объем наполнения; V_{min} – многолетний минимальный объем наполнения; $V_{ср}$ – многолетний средний объем наполнения; $V_{max\,расч}$ – максимальный расчетный полезный объем наполнения; V_{0max} – существующий полный проектный объем; $V_{0max\,расч}$ – расчетный полный объем наполнения; V_{mo} – существующий мертвый объем.

хранилищ естественного стока, при которых суточные средние объемы наполнения будут действительно средними.

Результаты вычисления по формуле (2) расчетных суммарных максимальных суточных объемов наполнения показаны на рис. 5. Из анализа графических зависимостей, приведенных на рис. 4, 5, установлено, что $W_{ср\,i}$ составляет 192–194 млн м^3 в конце апреля и начале мая. В эти периоды $W_{min\,i}$ = 65– 66 млн м^3. В результате расчета по зависимости (2) установим значение максимального расчетного суточного полезного объема наполнения водохранилищ естественного стока по результатам анализа многолетних средних и минимальных объемов наполнения $W^*_{max\,i}$ – 318–323 млн м^3. Эти величины необходимо принимать в качестве оценки суммарного полезного объема водохранилищ естественного стока. С учетом рекомендуемой расчетной величины мертвого объема, составляющей 5–10% полного проектного объема, получим, что суммарный полный проектный объем водохранилищ естественного стока Крыма необходимо увеличить как минимум до 330–350 млн м^3. Среднее расчетное значение максимального объема водохранилищ естественного стока – $W_{max\,i}$ = 340 млн м^3 – необходимо обеспечить в периоды максимального притока, в конце апреля, начале мая для более полного использования водотоков в период весенних и летних паводков.

При большой неравномерности территориального и сезонного распределения осадков, характерной для п-ова Крым, по величине суммарного объема наполнения водохранилищ естественного стока сложно выполнить анализ режимов водопользования в определенных районах и населенных пунктах. В работе [7] выполнен анализ величин притока естественного стока за 1986–2020 г. в водохранилища – источники водоснабжения г. Симферополя и прилегающих к нему районов, в которых сложилась наиболее сложная ситуация с водоснабжением. Система хозяйственно-питьевого водоснабжения обеспечивает водой г. Симферополь из трех водохранилищ естественного стока суммарным полным объе-

мом 74.3 млн м^3, в том числе: Симферопольского с проектным полным объемом 36, Партизанского – 34.4 и Аянского – 3.9 млн м^3. Фактический суммарный объем водохранилищ, обеспечивающих водоснабжение г. Симферополя, который можно использовать по их регламентам, составляет 66.5 млн м^3. Фактический объем водохранилищ отличается от полного на величину мертвого объема, который для каждого водохранилища коммунально-бытового водоснабжения устанавливается по санитарно-техническим требованиям и условиям обеспечения необходимого качества воды. Фактический запас воды водохранилищ реально уменьшается еще по причине испарения и фильтрации воды.

Выполненный анализ годового притока в водохранилища показал, что за рассмотренные 34 года 17 лет годовой приток был больше среднего притока и 17 лет – меньше его. Небольшая разница между средним годовым расходом водохранилищ на коммунально-бытовое водоснабжение г. Симферополя (62 млн м^3) и фактическим суммарным проектным объемом водохранилищ (66.5 млн м^3), обеспечивающих водоснабжение города без учета испарения и фильтрации, обусловливает зависимость водоснабжения города от цикличных изменений количества атмосферных осадков и температуры, что вызывает высокие риски дефицита воды. Годовой забор (расход) воды из водохранилищ, обеспечивающих водоснабжение г. Симферополя за 2009–2020 гг., также различается: максимальное значение (2017 г.) – 74.7, минимальное (2020 г.) – 46.8 млн м^3. Следует отметить, что наиболее высокие риски дефицита воды возникают при двух и более маловодных годах подряд, когда суммарный приток в водохранилища меньше среднего годового водозабора из водохранилищ для коммунально-бытового водоснабжения, как это было в 2008–2009 и 2012–2013 гг. При этом в течение пяти многоводных и средневодных лет по осадкам в период 2014–2018 гг. накопленные запасы воды в водохранилищах и приток в них обеспечивали коммунально-бытовое водоснабжение Симферополя в полном объеме.

Наливные водохранилища СКК в схеме водопользования Крымского п-ова были предназначены в основном для обеспечения водой сельскохозяйственного производства, городов и районов Восточного Крыма, а также для ликвидации дефицита водных ресурсов в маловодные годы в коммунально-бытовой сфере. Для больших городов Крыма – Симферополя и Севастополя, а также населенных пунктов Западного Крыма таким наливным водохранилищем было Межгорное суммарным объемом 50 млн м^3, строительство которого было завершено в 1989 г. Данные по объему забора воды из Межгорного водохранилища показали, что средняя годовая дополнительная подача воды за 2009–2013 гг. (в течение которых было три маловодных года) составила 13.8 млн м^3.

На рис. 6 представлен временнóй ход суточного наполнения водохранилищ естественного стока – источников водоснабжения г. Симферополя и прилегающих районов в 2020 и 2021 гг. Анализ представленных зависимостей показал, что фактическое наполнение этих водохранилищ в 2021 г. достигло уровня середины июня предыдущего 2020 г. В результате, к ноябрю 2021 г. суммарный объем наполнения водохранилищ, обеспечивающих водоснабжение Симферополя, стал в 2.8 раза больше, чем в 2020 г. При этом объем наполнения Симферопольского водохранилища стал в 2.1, Партизанского в 3.3, а Аянского в 4.5 раза больше. Такое наполнение было обеспечено за счет обильных осадков в центральной части Крымского п-ова в третьей декаде июня и первой декаде июля 2021 г. Следует отметить, что, несмотря на такой летний приток, объемы наполнения этих трех водохранилищ в ноябре составляют 42% полного проектного объема наполнения.

В целях обеспечения устойчивого водоснабжения Республики Крым и г. Севастополя в настоящее время реализуются мероприятия комплексного плана, утвержденного Правительством РФ [10], что обеспечивает важные оперативные решения по преодолению проблем водного дефицита на Крымском п-ове. Одно из этих мероприятий – разработка технико-экономического обоснования по возможности использования Межгорного водохранилища с полным проектным объемом 50 млн м^3 и создания дополнительных объемов водохранилищ естественного стока за счет более полного использования водотоков в период весенних и летних паводков.

Регионом с локальным дефицитом воды в 2020 и 2021 гг. стал Южный Берег Крыма (ЮБК), централизованное водоснабжение которого осуществляет Водоканал ЮБК (г. Ялта). Система водоснабжения обеспечивает питьевой водой население ЮБК от Гурзуфа до Фороса; основные источники водоснабжения: водохранилища Загорское и Счастливенское, находящиеся в Бахчисарайском районе, и до 40 источников, расположенных на склонах Южной гряды. Загорское водохранилище полным объемом 27.85 и полезным объемом 25.65 млн м^3 построено в 1981 г. Из Загорского водохранилища вода насосами перекачивается в водохранилище Счастливенское-2 с возможной среднесуточной перекачкой воды до 55 тыс. м^3. Счастливенский гидроузел состоит из трех источников: Ключевского водозабора, водохранилища Счастливое-1 объемом 27 тыс. м^3 и водохранилища Счастливое-2 с полным объем 11.8 и полезным – 11.54 млн м^3. Вода из Ключевского водозабора самотеком идет в тоннель Счаст-

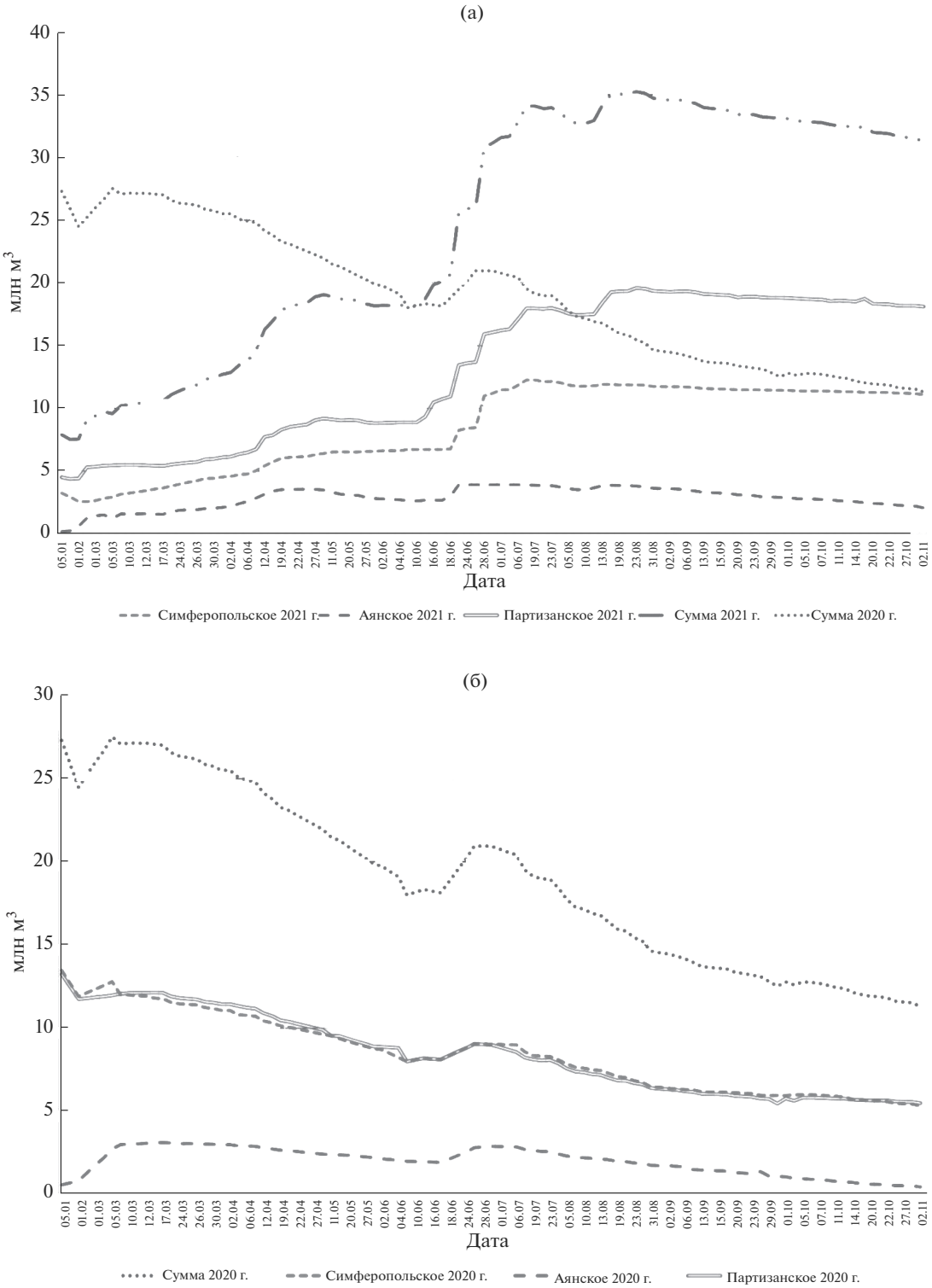

Рис. 6. Анализ наполнения водохранилищ – источников водоснабжения г. Симферополя: а – январь–октябрь 2021 г.; б – январь–октябрь 2020 г.

ливое–Ялта, а вода из водохранилища Счастливое-1 самотеком попадает в Счастливое-2. В систему водоснабжения ЮБК вода подается через Северный портал тоннеля Счастливое–Ялта длиной 7.25 км самотеком из водохранилища Счастливое-2.

Кроме этого, в систему водоснабжения ЮБК подается 5–9 млн м^3 воды в год из местных источ-

ников, выклинивающихся на южных склонах Крымских гор на высотах от 60 до 800 м над уровнем моря. Их дебет подвержен большим колебаниям в паводковый период и в межень. Основная их часть дает питьевую воду высокого качества, не требующую очистки, которая после обеззараживания подается потребителям и в резервуары чистой воды. Крупные местные источники – Хаста-Баш, водопады Уч-Кош и Массандровский, оз. Могаби из водопада Учан-Су. Возрастающий дебет местных источников в осенне-зимне-весенний период дает возможность сокращать забор воды из водохранилищ Загорского и Счастливенского и таким образом накапливать в них воду. До сооружения в середине 1960-х гг. Счастливенского гидроузла с гидротоннелем, соединяющим Северный и Южный порталы, местные источники были основным источником водоснабжения ЮБК.

На рис. 7 представлен временнóй ход суточного наполнения водохранилищ естественного стока – источников водоснабжения ЮБК в 2020 и 2021 гг. Анализ представленных зависимостей показал, что фактическое наполнение этих водохранилищ в 2021 г. достигло уровня наполнения в первой декаде мая предыдущего 2020 г. В результате к ноябрю 2021 г. суммарный объем наполнения водохранилищ, обеспечивающих водоснабжение ЮБК, стал в 3.5 раза больше, чем в 2020 г. При этом объем наполнения Загорского водохранилища стал в 4.9, а Счастливое-2 в 1.6 раза больше. Такое наполнение было обеспечено за счет таяния снега в центральной части Крымских гор, а также большого притока в период ливневых дождей в третьей декаде июня и в первой декаде июля 2021 г. Несмотря на максимальное водопотребление на ЮБК в период курортного сезона, объемы наполнения двух водохранилищ в ноябре 2021 г. составляют 79% полезного объема наполнения. Следует отметить, что для Загорского водохранилища регламентом установлен 10%-й зазор, так как его водосбросы не полностью отвечают техническим требованиям. Поэтому в июне–августе 2021 г. выполнялись технологические сбросы воды из Загорского водохранилища в суммарном объеме 4.9 млн м^3, что не допустило его полного наполнения.

Характерная особенность системы водоснабжения ЮБК – существенная неравномерность режимов потребления в связи со значительной разницей количества потребителей в летние и зимние месяцы, а также периодические возможности использования местных источников. На рис. 8 представлены фактические ежемесячные показатели Водоканала ЮБК в 2015 и 2018 гг.: суммарные заборы воды; объемы, подаваемые потребителям после водопроводных очистных сооружений (ВОС); забор воды из местных источников; объемы реализованной воды, а также суммарные потери, которые складываются из текущих и аварийных утечек, неучтенных расходов, коммерческих и некоммерческих потерь.

Из анализа представленных данных по сезонности водопотребления следует, что в августе по сравнению с зимними месяцами забор воды в систему водоснабжения ЮБК увеличивался в 1.59–1.87 раза в 2015 г. и 1.77–1.93 раза в 2018 г. Максимальная величина суточного забора воды в августе за рассмотренный период составила 100 тыс. м^3. Объемы используемых вод из местных источников водоснабжения в зимние и весенние месяцы в 2015 г. достигали 81–92, а в 2018 г. – 57–66% общего забора. Следует отметить, что технологические потери при максимальном водозаборе из местных источников уменьшались и составляли в 2015 г. 5–8, а в 2018 г. – 3–7%, что свидетельствует о высоких показателях качества исходной воды. При этом общие ежемесячные потери составляли в 2015 г. 45–53, а в 2018 г. 48–53% величины забора воды.

В Сингапуре за счет экономически эффективных и экологически обоснованных способов сбалансирования городского водного бюджета достигнуто снижение утечек и потерь воды в городских системах распределения до 5% объема забора, это самый низкий показатель в мире [14]. Снижение потерь в системах водоснабжения равносильно увеличению объемов доступных водных ресурсов. По мере роста дефицита водных ресурсов водосберегающие технологии становятся наименее дорогостоящим и наиболее экологически безопасным способом удовлетворения потребностей в воде коммунального хозяйства городов по сравнению с традиционными инженерными подходами, ориентированными на увеличение объемов водозабора из доступных источников.

Реки и водостоки, формирующиеся на южных склонах Крымских гор, имеют относительно малые длины и площади поверхностного водосбора, но отличаются максимальными уклонами. Существенно отличаются среднемноголетние расходы этих местных источников систем водоснабжения от максимальных расходов в паводок. Эти различия связаны со значительным подземным питанием карстовыми водами, дренирующими значительную часть Ай-Петринского горного массива ЮБК. Так, наибольший расход Массандровского водопада в паводок достигает 22.8 м^3/с, что соответствует 2 млн м^3/сут, при этом среднемноголетний расход – 0.21 м^3/с, что составляет 18.1 тыс. м^3/сут, или 6.6 млн м^3/год [5, 8, 11]. Аналогично река и водопад Учан-Су имеют наибольший расход 60 м^3/с, что соответствует 5.2 млн м^3/сут, а средний многолетний расход – 0.34 м^3/с, что составляет 29.3 тыс. м^3/сут, или 10.7 млн м^3/год [13]. Это значит, что реки и водо-

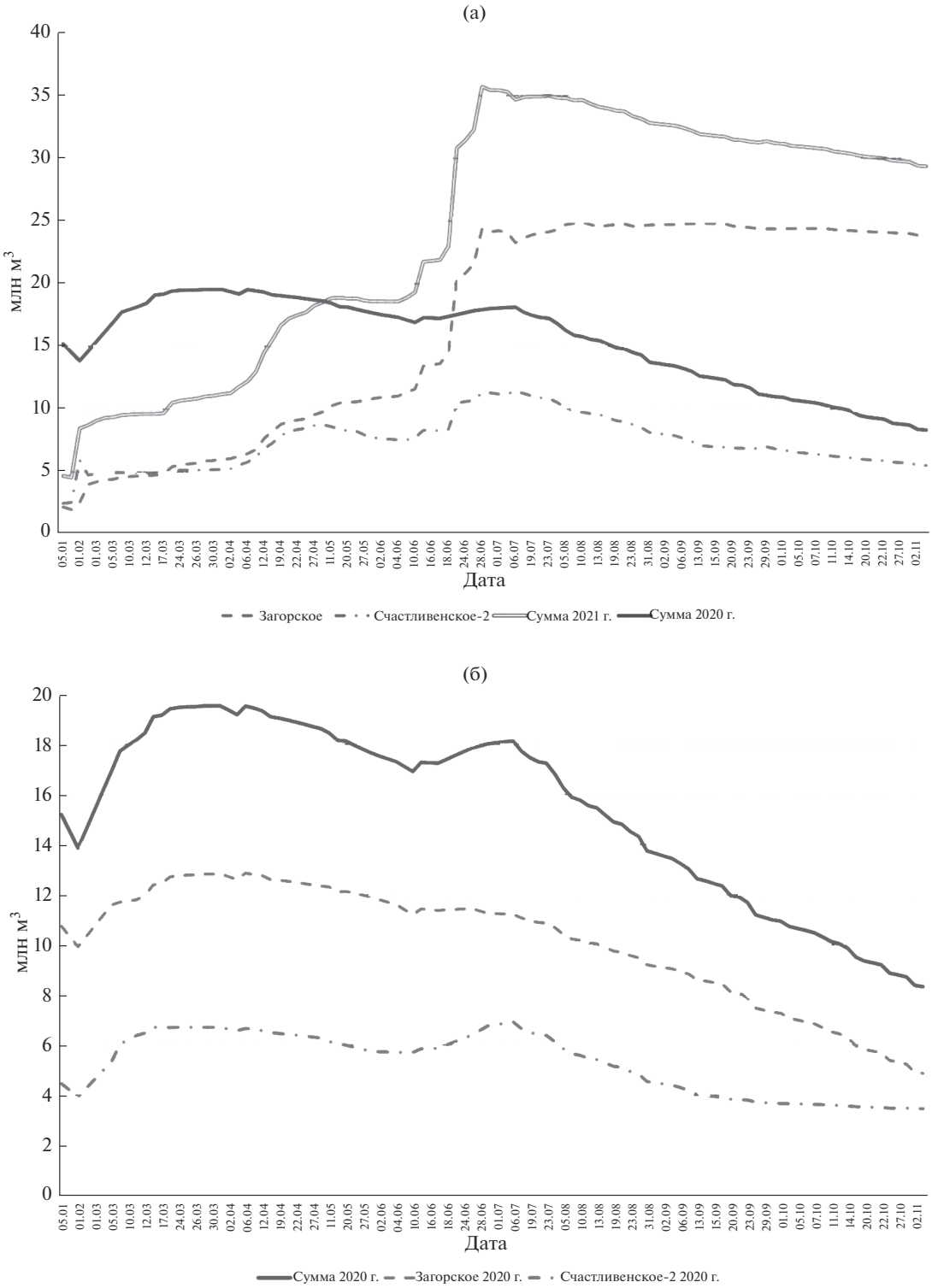

Рис. 7. Временно́й ход наполнения водохранилищ – источников водоснабжения ЮБК: а – январь–октябрь 2021 г., в том числе для сравнения – суммарный приток за 2020 г.; б – январь–октябрь 2020 г.

стоки, формирующиеся на южных склонах Крымских гор за несколько суток в периоды паводков, сбрасывают в море объемы воды, равные среднемноголетнему годовому стоку. Существующие поверхностные водозаборы из местных источников, формирующихся на южных склонах Крымских гор, имеют возможность подачи 50–55 тыс. м^3 воды, а действующие резервуары чи-

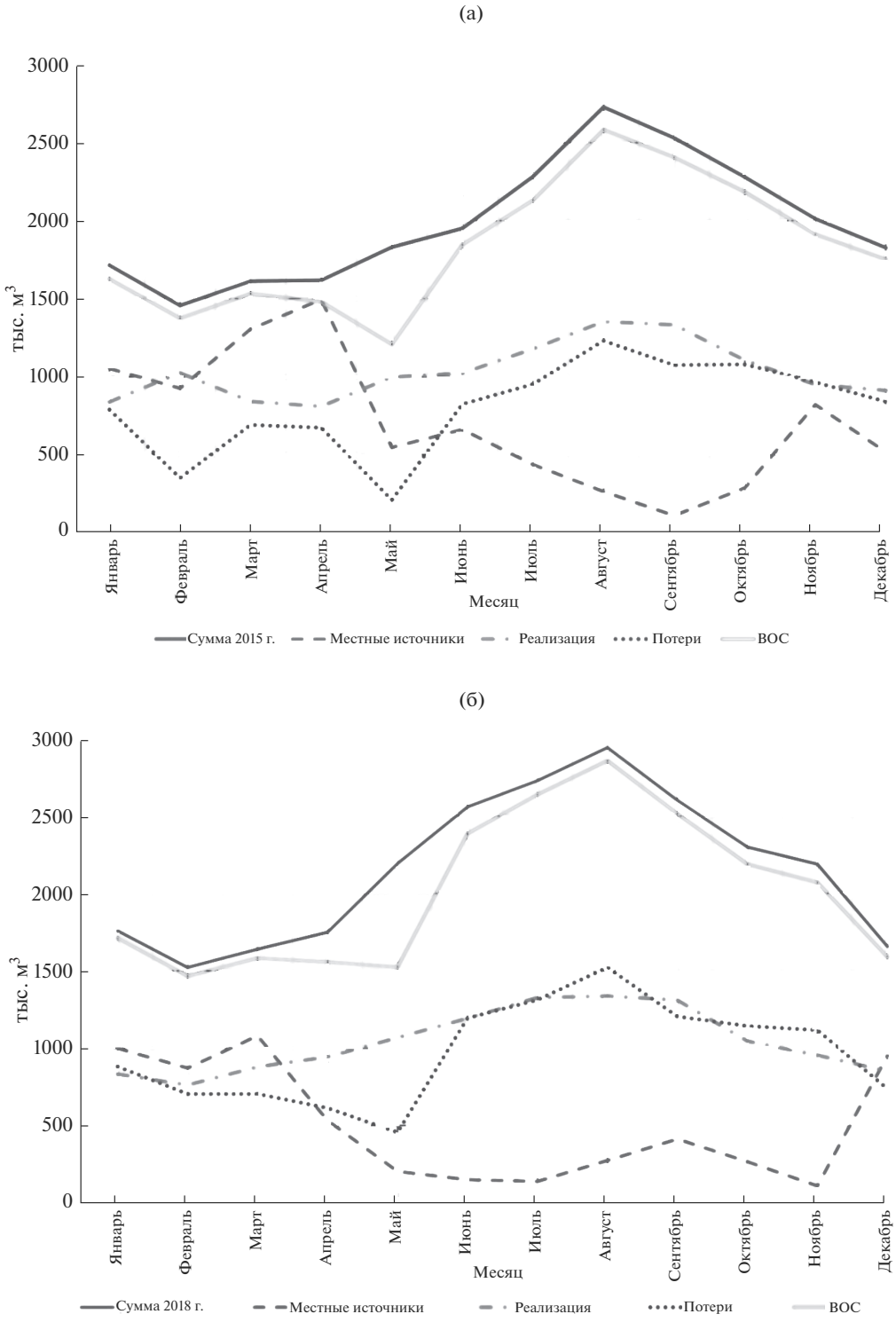

Рис. 8. Фактические ежемесячные данные Водоканала ЮБК: а – 2015 г.; б – 2018 г.

стой воды Водоканала ЮБК для системы водоснабжения могут аккумулировать до 100 тыс. м^3 воды, т. е. максимальную суточную подачу. Значит, существующая система подачи воды Водоканала ЮБК из местных источников не способна использовать огромный потенциал водных ресурсов в режиме их наибольших расходов. В результате большая часть пресной воды, пригодной для системы водоснабжения ЮБК, уходит в море, а этот район в настоящее время обладает наиболь-

шим потенциалом неиспользуемых водных ресурсов, пригодных для питьевого водоснабжения.

На рис. 9 представлены диаграммы фактических годовых показателей Водоканала ЮБК в 2015 и 2018 гг.: суммарных заборов воды, объемов воды, подаваемых потребителям с ВОС, забора воды из местных источников, объемов реализованной воды, а также суммарных потерь. Из анализа представленных диаграмм следует, что за рассмотренный период (2015–2018 гг.) годовой водозабор для системы водоснабжения ЮБК составил 23.8–25.1 млн м^3. Забор из местных источников в 2015 г. составил 8.4 млн м^3, что обеспечило 35% общего объема водопотребления ЮБК, а в 2016 г. забор воды составил 5 млн м^3, что обеспечило 20% годового водозабора. Следовательно, применение и аккумулирование водных ресурсов местных источников, формирующихся на южных склонах Крымских гор, в режиме их наибольших расходов позволит существенно расширить возможности системы водоснабжения ЮБК, а также поможет избежать вододефицитные годы, в том числе и в летние периоды максимального водопотребления. Местные источники воды верхних уровней (на высотах от 800 м) имеют высокие показатели качества и для них требуется только обеззараживание, для местных источников среднего уровня (на высотах от 300 м) требуются стандартные технологические процессы водоподготовки. Вода местных источников нижнего уровня (на высотах от 60 м) подвержена сильному антропогенному загрязнению, и для нее требуется разработка специальных методов водоподготовки с учетом ее показателей качества.

Анализ представленных на рис. 9 диаграмм показывает, что годовые технологические потери Водоканала ЮБК за рассмотренный период составляют 7–8, а общие потери – 40–45%. Поэтому растущие потребности в водных ресурсах на ЮБК могут быть удовлетворены не только увеличением объемов забора свежей воды из доступных водных объектов, но и за счет мероприятий по снижению потерь воды, повышению водоэффективности и водосбережения, которые в современном глобальном мире становятся основными для решения проблем дефицита воды.

Автоматизация, адаптивное управление и оптимизация технологических процессов – наиболее важные способы повышения эффективности использования природных ресурсов, энергии, а также уменьшения объемов их потребления. В сфере систем водоснабжения в последние десятилетия начала применяться акватроника как комплексная система автоматизации технологических процессов на основе современного компьютерного, аппаратного и программного обеспечения. Это новое направление актуально для водосбережения на ЮБК, оно позволяет существенно снизить потери до уровня развитых стран с дефицитом водных ресурсов. Сокращение потерь от забора воды за счет более эффективной ее подачи, распределения и использования различными потребителями уменьшает водопотребление, что фактически создает новый источник водоснабжения [7]. Уменьшение водопотребления также приводит к снижению антропогенной нагрузки на водные объекты, что создает условия для сохранения водных ресурсов и улучшения качества воды. В результате увеличиваются объемы доступных водных ресурсов, что снижает риски водных дефицитов. Внедрение современных компьютерных систем контроля, адаптивного управления и автоматизации технологических процессов в системах водоснабжения позволяют снизить утечки и потери воды в городских системах распределения до ~10%. Внедрение акватроники – один из наиболее актуальных, экономически эффективных и экологически обоснованных способов согласования водного баланса регионов [6, 7].

Несмотря на то, что водные ресурсы – часть глобальной системы природопользования, при их дефиците и неравномерном распределении по временам года и по территории основное влияние на водный баланс должны оказывать локальные системы управления, т. е. то, как водные ресурсы используются и управляются на местном и региональном уровнях [1, 15]. Международный опыт стран с дефицитом и неравномерным распределением водных ресурсов показывает, что актуальный метод водопользования – соединение доступных источников в единую гидротехническую систему с возможностью автоматизированного переброса необходимых объемов воды в зоны, где она требуется. Пример такого технического решения в Израиле – мощный комплекс гидротехнических сооружений – Трансизраильский водовод, объединивший в единое целое все источники водоснабжения для распределения воды по всем районам страны, где она требуется. Водовод состоит из трубопроводов, насосных станций, каналов, туннелей и резервуаров-хранилищ, в которые в сезон ливней собирают дождевую воду. Пропускная способность водовода – 72 тыс. м^3 воды/ч, что соответствует 1.7 млн м^3/сут [15].

Для обоснования способов обеспечения водной безопасности Республики Крым и г. Севастополя необходимо создание перспективной балансовой схемы водного хозяйства п-ова Крым с разработкой схемы “Всекрымского водовода” для объединения в единое целое источников водоснабжения, для распределения воды по водохранилищам в разных зонах полуострова с исключением сброса водных ресурсов. Такая модель разрабатывается с учетом ограниченных возможностей регулирования объемов наполнения водохранилищ естественного стока для удовлетворе-

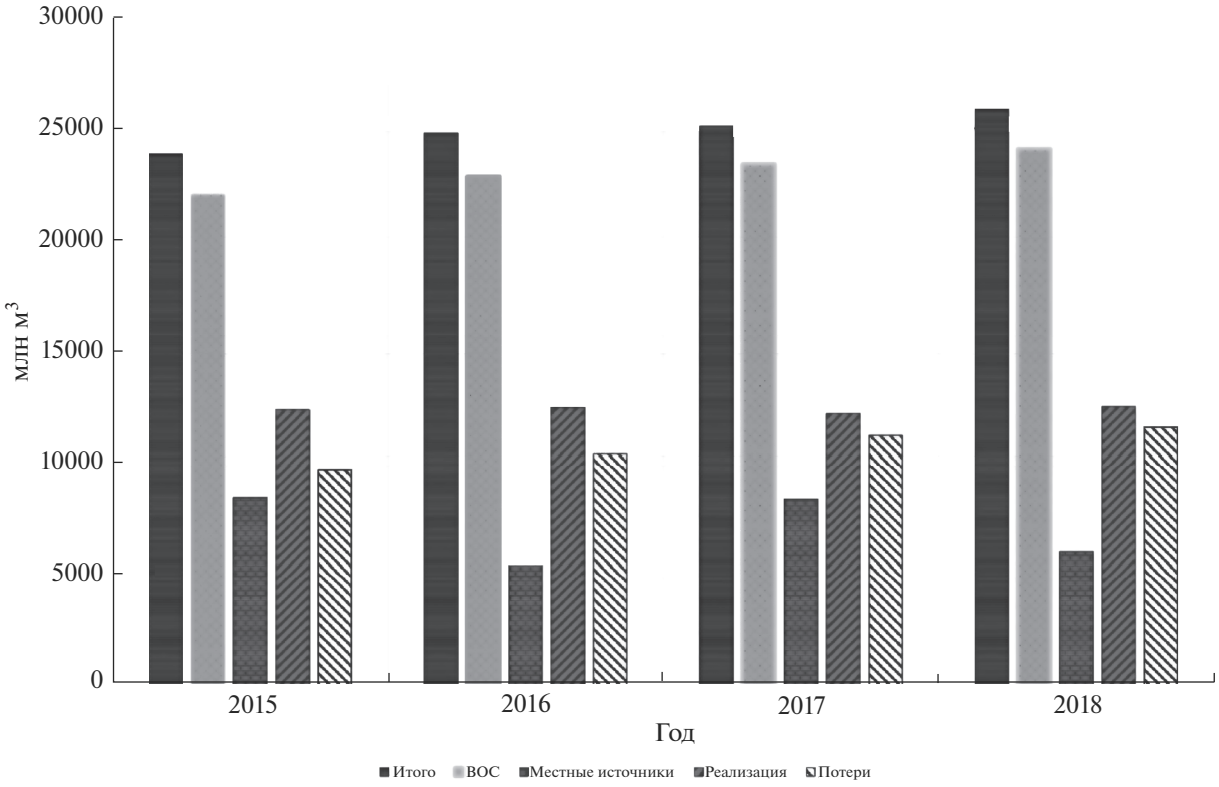

Рис. 9. Фактические годовые данные Водоканала ЮБК.

ния потребности в воде всех видов потребителей, а также с учетом недостаточной эффективности использования водных ресурсов на отдельных водохозяйственных участках [9].

В связи с глобальным водным кризисом в XXI в. большинство стран с дефицитом водных ресурсов техническими средствами и технологическими методами создают доступ к дополнительным неиспользуемым водным ресурсам за счет увеличения объемов сбора паводковых, ливневых, сбросовых и талых вод, а также очистки сточных вод для последующего использования. В Сингапуре, импортирующем пресную воду, придерживаются стратегии самых дешевых вариантов обеспечения водными ресурсами. К ним в первую очередь относится сбор ливневых вод, которые составляют важную часть водоснабжения. Агентство по водоснабжению направляет через сеть стоков и каналов две трети городского поверхностного стока в 17 водохранилищ, где он затем очищается и идет на питьевое водоснабжение. Кроме сбора ливневых вод и устранения потерь в системе водоснабжения, Сингапур продвинулся вперед в области рециркуляции и прямого повторного использования своих сточных вод, которые могут удовлетворить до 30% текущего спроса страны в воде [16].

Выполненный анализ показывает, что на п-ове Крым возможно обеспечение собственными водными ресурсами, однако для устойчивого функционирования систем водоснабжения необходима разработка новой концепции развития водного хозяйства на основе многовекового опыта водопользования, перехода к его интенсивным способам и современным технологиям решения проблем водного дефицита.

ВЫВОДЫ

Разработка комплекса мероприятий по обеспечению водной безопасности Республики Крым и г. Севастополя должна основываться на детальном анализе многовекового опыта водопользования на Крымском п-ове, совмещении экстенсивных и интенсивных методов решения проблем дефицита водных ресурсов на основе внедрения принципов водосбережения и водоэффективности.

Выполненный анализ данных по наполнению водохранилищ естественного стока Крыма за многолетний период показал, что их суммарный полный проектный объем занижен на 70 млн м^3. Для более полного использования водотоков в период весенних и летних паводков многоводных лет суммарный полный проектный объем водохранилищ естественного стока Крыма необходимо увеличить как минимум до 340 млн м^3.

Важное мероприятие по обеспечению водной безопасности г. Симферополя и прилегающих районов с надежным прохождением вододефицитных периодов – использование существующего наливного Межгорного водохранилища СКК с полным проектным объемом 50 млн м^3 для создания дополнительного объема водохранилищ естественного стока за счет более полного использования водотоков в период весенних и летних паводков.

Существующая система подачи воды Водоканала ЮБК из местных источников не способна использовать огромный потенциал водных ресурсов в режиме их наибольших расходов. В результате большая часть пресной воды, пригодной для системы водоснабжения ЮБК, во время паводков уходит в море.

Использование и аккумулирование водных ресурсов местных источников, формирующихся на южных склонах Крымских гор, в режиме их наибольших расходов позволят существенно увеличить возможности расширения системы водоснабжения ЮБК, а также надежно обеспечит преодоление вододефицитных лет, в том числе и в летние периоды максимального водопотребления.

Разработка и внедрение современных компьютерных систем контроля, адаптивного управления и автоматизации технологических процессов в структурных элементах систем водоснабжения позволяют снизить утечки и потери воды до 10% величины ее забора, это один из наиболее актуальных, экономически эффективных и экологически обоснованных способов решения проблем обеспечения водной безопасности Республики Крым и г. Севастополя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Данилов-Данильян В.И.* Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России. М.: Типография Левко, 2009. 88 с.
2. *Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С.* Потребление воды: экологические, экономические, социальные и политические аспекты. М.: Наука, 2006. 221 с.
3. *Каюкова Е.П., Барабошкина Т.А., Бударина В.А.* Ресурсный потенциал пресных вод Крыма. Ст. 2. Водные ресурсы, экология и политика // Вест. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2016. № 1. С. 131–135.
4. *Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г.* Водные ресурсы Крыма // Геоэкология. инженерная геология. гидрогеология. Геокриология. 2015. № 6. С. 505–512.
5. *Лисовский А.А., Новик В.А., Тимченко З.В., Мустафаева З.Р.* Поверхностные водные объекты Крыма: Справочник. Симферополь: Рескомводхоз АРК, 2004. 113 с.
6. *Николенко И.В.* Акватроника – новое направление кадрового обеспечения водохозяйственного комплекса // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. № 11 (119). С. 4–13.
7. *Николенко И.В., Копачевский А.М.* Основные направления разработки комплекса мер по решению проблем дефицита воды в Крыму // Строительство и техногенная безопасность. 2021. Вып. 21 (73). С. 115–133.
8. *Олиферов А.Н., Тимченко З.В.* Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с.
9. Постановление Правительства РФ от 19.04.2012 № 350 “О федеральной целевой программе “Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах””. 31.05.2017. http://government.ru/docs/37156/ (дата обращения 07.03.2021)
10. Распоряжение Правительства РФ от 16.10.2020 № 2668-р. http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010200016?index=0&rangeSize=1
11. *Тимченко З.В.* Гидрография и гидрология рек Крыма. Симферополь: Ариал, 2012. 290 с.
12. Устойчивый Крым. Водные ресурсы / Под ред. *В.С. Тарасенко.* Симферополь: Таврида, 2003. 413 с.
13. *Шутов Ю.И.* Воды Крыма. Симферополь: Таврия, 1979. 95 с.
14. *Postel S.* Replenish. The Virtuous Cycle of Water and Prosperity. N.Y.: Island Press, 2017. 339 p.
15. *Postel S.* The last oasis. Facing water scarcity. London: Earthscan Publications Ltd., Worldwatch Institute, 1992. 226 p.
16. *Tang A.* From Open Sewage to High-Tech Hydrohub, Singapore Leads Water Revolution // Reuters. 2015. August 2. http://www.reuters.com/article/us-singapore-water