

СОДЕРЖАНИЕ

Том 49, номер 4, 2022

ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ АРИДНЫХ РЕГИОНОВ

Научное обеспечение водной безопасности Крыма: проблемы и решения <i>В. И. Данилов-Данильян, М. А. Козлова, В. О. Полянин, И. В. Чеснокова</i>	363
Рациональное водопользование в Республике Крым: значение, ограничения, подходы к достижению <i>Н. Е. Волкова, Н. М. Иванютин, В. С. Тарасенко, В. С. Паштецкий, С. В. Подвалова</i>	372
Водная безопасность степного Крыма и возможные пути ее повышения <i>Е. М. Гусев, Л. Я. Джоган, О. Н. Насонова</i>	382
Водопотребление и водоотведение в муниципальных образованиях Республики Крым и г. Севастополе: современное состояние и проблемы <i>А. П. Демин, А. В. Зайцева, М. А. Харламов</i>	395
Анализ наполнения водохранилищ естественного стока для обоснования путей решения проблем обеспечения водной безопасности республики Крым и города Севастополя <i>И. В. Николенко, А. М. Копачевский, Э. А. Каримов</i>	407
Оценка собственных возобновляемых водных ресурсов Крымского полуострова <i>А. Г. Косицкий, Е. М. Богуцкая, М. Г. Гречушникова, В. Ю. Григорьев, А. А. Сазонов, М. А. Харламов, Н. Л. Фролова</i>	423
Основные проблемы гидрогеологии карста Крымского полуострова <i>Б. А. Вахрушев, Г. Н. Амеличев, С. В. Токарев, Г. В. Самохин</i>	437
Меры вертикальной протяженности речных систем как индикаторы условий их формирования (на примере гор Крыма и Черноморского побережья Кавказа) <i>Б. И. Гарцман, П. А. Белякова, К. В. Сучкова, Е. А. Шекман, А. Л. Энтин</i>	448
Экстремальные паводки на реках Крыма в 2021 году <i>Г. С. Ермакова, О. В. Горелиц, К. К. Жбаков, И. В. Землянов, И. Ю. Милютина</i>	460
Изотопно-геохимические характеристики природных вод юго-западной части Крымского полуострова <i>Н. А. Харитоновна, Е. А. Филимонова, Е. А. Картунов, В. Н. Самарцев, Е. В. Дробязко, Я. В. Сорокоумова, М. Г. Гречушникова, А. Л. Прошкина, С. П. Поздняков</i>	474
Формирование химического и изотопного состава поверхностных вод открытых водоемов бассейна реки Бодрак (северо-западный склон Крымских гор) <i>Е. П. Каюкова, Н. А. Харитоновна, Е. А. Филимонова, М. В. Чарыкова</i>	492
Сценарные прогнозы изменений температурного и гидрологического режима Крыма в XXI веке по данным моделей климата CMIP6 <i>В. А. Семенов, М. А. Алешина</i>	506
Прогноз выпадения осадков в районе Ай-Петри на основе модели искусственной нейронной сети <i>А. С. Лубков, Е. Н. Воскресенская, О. Ю. Сухонос</i>	517
Исследование опыта решения проблем водоснабжения в средневековом Крыму (Судак XIV–XV вв.) <i>В. В. Майко, А. Л. Чепалыга, В. А. Захаров</i>	527

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 504.06

**НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КРЫМА:
ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ¹****© 2022 г. В. И. Данилов-Данильян^а, М. А. Козлова^а *,
В. О. Полянин^а, И. В. Чеснокова^а**^а *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия***e-mail: mblshok@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 18.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Проанализированы современные представления о водных ресурсах Крыма, отмечена недостаточность знаний о поверхностных водах и, тем более, месторождениях подземных вод, а также взаимосвязях тех и других. Рассмотрены и негативно оценены возможности удовлетворения потребностей в воде за счет внешних источников на среднесрочную перспективу. Выдвинуто предположение о возможности полноценного водобеспечения населения и экономики Крыма из собственных источников за счет рационального их использования, интегрированного управления водными ресурсами и модернизации водного хозяйства. Выявлены основные факторы формирования качества воды в природных водных объектах Крыма, указаны некоторые направления развития мониторинга качества вод и меры по его улучшению. Наводнения в 2021 г. в Крыму рассмотрены как сигнал к тому, чтобы такую угрозу рассматривать как постоянный фактор; отмечены антропогенные обстоятельства, усиливающие риск наводнений, и меры по снижению риска.

Ключевые слова: Крымский полуостров, вододефицит, водная безопасность, поверхностные воды, подземные воды, карст, качество воды, загрязнение водных объектов, наводнения, страхование, страховые индексы территорий, интегрированное управление водными ресурсами.

DOI: 10.31857/S0321059622040022**ВВЕДЕНИЕ**

Крым – наиболее вододефицитный регион Российской Федерации (а также Европы). Объем возобновляемых водных ресурсов на душу населения составляет здесь, по разным оценкам, от 400 до 700 м³/год. По классификации ФАО ООН, Крым относится к регионам мира с “абсолютным” дефицитом водных ресурсов. Этот обусловленный природными условиями дефицит практически полностью покрыт вводом Северо-Крымского канала (СКК) в 1971 г., однако решением властей Украины в 2014 г. подача воды в Крым по СКК была полностью прекращена.

2014–2018 гг. оказались многоводными, и ценой отказа от рисосеяния удалось справиться с дефицитом воды без особых потерь. Это послужило причиной для совершенно необоснованных надежд на то, что водный дефицит в Крыму и в дальнейшем не будет столь жестким, как можно ожидать по среднесулетним гидрометеорологическим данным, и для его преодоления не тре-

буется экстраординарных мер. Но пятилетний многоводный период – исключительная редкость для Крыма, и в 2019 г. дефицит воды проявился в полной мере, хотя этот год надо признать средним по водности. Маловодным случился следующий 2020 г., и ситуация с водобеспечением на полуострове уже в начале лета была признана катастрофической. Крымский водный дефицит (впервые после воссоединения с Россией), наконец, был осознан как важнейшая общегосударственная проблема – проблема национальной безопасности. Это породило появление и извлечение из архивов массы “проектов”, большинство которых способны поразить специалистов своей неадекватностью реальным условиям или некомпетентностью авторов. СМИ забиты суждениями этих “проектов” (в основном на дилетантском уровне), в то время как необходимости в серьезном научном анализе ситуации и разработке основанных на нем мер обеспечения водной безопасности Крыма почти не уделяется внимания. Наконец, 2021 г. ознаменован небывалыми для Крыма наводнениями в его восточной части и на Южном побережье. Оказалось (в полном соответствии с глобальными климатологиче-

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0126–2021–0001, государственная регистрация 121040700170–9, тема FMWZ–2022–0002).

скими прогнозами), что неустойчивость климата, экстремальные погодно-климатические явления противоположной направленности возможны и в Крыму, и надо быть готовыми к таким событиям.

ПРОБЛЕМЫ ДЕФИЦИТА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА КРЫМСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

Дефицит водных ресурсов в Крыму усугубляется совершенно недостаточным знанием об их реальном наличии на полуострове, водном режиме природных водных объектов (поверхностных и подземных), гидрологических требованиях и экологических ограничениях по их эксплуатации, крайней неэффективностью их использования – сказывается своего рода самоуспокоенность, наступившая после сооружения СКК.

Поверхностные воды Крыма остаются малоизученными. Все заметные водотоки берут начало в горной части полуострова, где сильно развит карст, и, как правило, существенную роль в их питании играют подземные воды. Связь с подземными водами карстующихся пород определяет “капризность” и плохую предсказуемость режима крымских рек. Особенно заметным это стало при изучении хода наводнений в 2021 г. Однако без детального описания (с помощью гидрогеологических моделей) взаимодействия поверхностных и подземных вод целостное представление о водных ресурсах Крыма сформировать нельзя.

Подземные воды полуострова активно исследовались в 1960–1970-е гг., но с тех пор данных о них почти не прибавилось. Проводившиеся ранее геологоразведочные работы обычно ограничивались изучением высоко расположенных (до 180 м) водоносных горизонтов. Современные геофизические методы позволяют быстро, с относительно малыми затратами (порядка 280 млн руб. на весь полуостров) и надежно изучать пласты с залеганием до 300 м. Геофизическое сканирование всей территории Крыма на эту глубину можно осуществить за 3–4 мес. Успешный опыт таких работ в России имеется, и можно только удивляться тому, что они до сих пор не выполнены, хотя предложения осуществить их подавались с 2014 г. неоднократно.

Некоторые эксперты полагают, что обнаружение крупных месторождений пресных вод в Крыму маловероятно. Это мнение основано на гипотезе о том, что практически под всей территорией полуострова на глубине 180–200 м расположен водоупорный (глинистый) горизонт, определяющий подземный сток в море всей воды, “остающейся” после поверхностного стока и испарения и не удерживаемой почвогрунтами выше этого горизонта. Но высказана и иная точка зрения, согласно которой, под водоупорным горизон-

том могут располагаться трещиноватые пласты (прежде всего известняки), содержащие значительные запасы воды, в том числе и пресной. Невозобновляемые запасы подземных вод образовались, с большой вероятностью, из-за фильтрации при эксплуатации СКК в течение почти полувека; соответствующие потери на крымском участке канала составляли, по-видимому, ~40%. Такие запасы могут выполнять функцию резерва в особо кризисные для водоснабжения годы.

Для эффективного управления водным хозяйством и особенно для планирования его долгосрочного развития необходима информация о водопользовании и его перспективах. Однако в настоящее время отсутствуют надежные оценки объемов потребления воды по видам деятельности, нет и прогнозов развития различных типов производств. Практически бесконтрольно осуществляется сброс загрязненных вод в море. Неудовлетворительно и состояние самого водного хозяйства. Его материально-техническая база отстала от современных стандартов развитых стран по крайней мере на 40 лет. Гидроизоляция открытых каналов (тем более водохранилищ) – большая редкость, трубы водоводов и водопроводных сетей изношены, в избытке наблюдаются протечки, оборудование на станциях водоподготовки и водоочистки почти повсеместно требует замены. Естественно, что такое состояние водного хозяйства усугубляет дефицит воды [6].

Представляется вполне вероятным, что экономика Крыма сможет полноценно развиваться на основе эксплуатации собственных водных ресурсов, без привлечения внешних источников, а также без массового использования “нетрадиционных” (кондиционирование, опреснение и пр.) способов производства пресной воды. И только от рисосеяния придется отказаться, но при умелой организации сельского хозяйства это не скажется на объеме производства продукции и его эффективности [5].

Возможности решения проблем водной безопасности Крыма при переходе на местные водные ресурсы связаны с необходимостью структурной перестройки водного хозяйства региона на основе принципов интегрированного управления. Опыт внедрения этих принципов накоплен экономически развитыми странами с удельной водообеспеченностью, близкой к той, что имеется в Крыму (Дания, ЮАР, вододефицитные районы на юго-западе США), или существенно более низкой (Израиль, Сингапур). Опыт таких стран показывает, что эффективные решения в этой области должны опираться на надежные оценки водноресурсного потенциала региона в целом и его отдельных районов, прогнозы изменений водного режима рек и запасов подземных вод для задач оперативного управления водноресурсны-

ми системами, оценки возможных изменений водных ресурсов при различных сценариях хозяйственной деятельности и будущего климата для задач стратегического планирования. Инструментами таких оценок и прогнозов в экономически развитых странах служат системы поддержки принятия решений.

Из активно обсуждаемых идей, реализация которых, как предполагают их авторы, решит проблему дефицита воды в Крыму или во всяком случае ослабит ее остроту, прежде всего следует назвать проект переброски в Крым воды из р. Кубани. При этом не принимается во внимание, что бассейн Кубани тоже водонедостаточный регион, в маловодные годы потребность в пресной воде здесь удовлетворяется в лучшем случае на 60%, а такие годы здесь – обычное явление, причем они могут случаться “сериями” по шесть лет подряд. Строительство водохранилища в нижнем течении Кубани, каналов, насосных станций и, особенно, сооружение водовода под Керченским проливом потребуют, по явно заниженным оценкам, порядка 200 млрд руб. капиталовложений, но главное – все это не решит проблем Крыма: в среднем один раз в три года никакой воды для подачи через эту систему просто не будет (именно в те годы, когда вода особенно нужна).

Распространять крымскую водную проблему на Краснодарский край – во всех отношениях неприемлемо. Идея строительства водохранилища в низовьях Кубани для перехвата паводковых вод, возможно, реализуема, но тогда это водохранилище следует использовать как дополнительный источник воды в Краснодарском крае, а не для переброски в Крым. Очевидно, что и капитальные затраты будут существенно ниже (не требуется ничего подобного водоводу через Керченский пролив), и текущие издержки не будут включать весьма значительных составляющих, определяемых необходимостью подъема воды после Керченского пролива.

Поиски пресной воды под дном Азовского моря представляются бесперспективными. Даже если там существует водоносный горизонт (или линзы) с пресной водой, его эксплуатация обусловит процесс восполнения месторождения, но в данном случае восполнение наверняка будет осуществляться водой Азовского моря. Эта вода имеет минерализацию 14‰, и при таком восполнении быстрое засоление месторождения с исходно пресной водой неизбежно.

Предлагается проект строительства опреснительного завода в Ялте. Эта идея страдает серией неисправимых недостатков. Во-первых, категорически нельзя строить промышленное предприятие в центре ценнейшего курортного района. Во-вторых, если уж заниматься опреснением

морской воды для Крыма, то не черноморской с минерализацией 18‰, а азовской – на 4‰ менее соленой. В-третьих, опреснение – весьма энергоемкий процесс, внятного ответа на вопрос, откуда взять для него энергию в Крыму (не только в Ялте), не имеется (АЭС в курортном районе строить нельзя, ТЭС – крайне нежелательно, до достаточно масштабного освоения возобновимых источников энергии в России еще далеко). И вообще: экономическая эффективность опреснения для Крыма – весьма сомнительна. Более перспективными представляются другие нетрадиционные способы получения пресной воды: кондиционирование водяных паров из воздуха (аналогами бытовых установок – обычных кондиционеров, иногда одновременно выполняющих функции калорифера), методы активного метеорологического воздействия, позволяющие добиваться усиления осадков.

Необходимо подчеркнуть: рациональное решение проблемы водоснабжения Крыма возможно только на основе полных системных знаний о собственных запасах воды на полуострове, их экономически эффективная эксплуатация требует создания системы интегрированного управления водными ресурсами.

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ВОДЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КРЫМА

Не менее важный критерий водной безопасности – качество воды, а также общее экологическое состояние водосборных территорий и областей питания поверхностных и подземных водных объектов. На химический состав природных вод очень сильное влияние оказывают природно-климатические и местные литологические особенности, режим формирования стока и строение гидрографической сети. Например, для большинства рек в их среднем и нижнем течении речной сток имеет транзитный характер, поскольку густота речной сети на этих участках невысокая и сколько-нибудь значимые притоки, как правило, отсутствуют, а расходы воды во многих водотоках имеют выраженную тенденцию к уменьшению по мере движения воды к устью. Это вызвано как отсутствием дополнительной подпитки, значительными испарением и инфильтрацией в относительно рыхлые пойменно-русловые отложения, так и отбором воды на орошение полей и личных подсобных хозяйств. Изъятие воды на отдельных участках часто достигает половины стока реки в меженный период. На этом фоне многие специалисты отмечают заметное ухудшение качества воды Крымских рек, например Салгира, Биюк-Карасу, Дерекойки и др., от верховьев вниз по течению [9].

Природная составляющая такого ухудшения наиболее значимо проявляет себя в центральной и северной частях Крыма и на Керченском п-ове — зонах с недостаточным увлажнением в условиях преобладания испарения над осадками и засоленности почвогрунтов, где речные воды характеризуются высокой (иногда >2 г/л) минерализацией, жесткостью и преобладанием в солевом составе хлоридов, сульфатов и ионов натрия [22]. Те же показатели превышены и в подземных водах на значительной части Крымского п-ова, что, по данным Межрегионального управления Роспотребнадзора по Республике Крым и г. Севастополю, — лимитирующий фактор водоснабжения населения таких, например, городов, как Красноперекопск, Евпатория, Саки, Красноперекопского района [23]. Аналогичная ситуация складывается в Нижнегорском и Джанкойском районах, где наблюдаются отдельные очаги минерализации до 2 г/л и высокой жесткости. В северных и северо-восточных районах минерализация может достигать до 5 г/л [12]. В целом по Крыму на сегодняшний день минерализация не соответствует требованиям санитарно-питьевых норм на 184 месторождениях подземных вод [14], а разведанные запасы подземных вод, предполагаемые к эксплуатации, учитывают воды с минерализацией до 1.5 г/л [25]. При этом риски дальнейшего засоления подземных вод скорее всего будут оставаться очень высокими, что требует отдельного уточнения для каждого из крупных подземных водозаборов, эксплуатирующихся на полуострове. Действительно, в результате эксплуатации тысяч скважин скорости ежегодного понижения уровней подземных вод составляют от десятков сантиметров до 1.5 м, что приводит к подсыванию вод с повышенной минерализацией. Например, по оценкам [8], в Красноперекопском районе скорость продвижения соленых вод с С на Ю достигает 440 м/год.

От несоответствующей питьевым нормам воды особенно страдают жители сельской местности [12]. Анализ заболеваемости населения, выполненный в [3], показывает, что случаи поражения мочеполовой системы в 2014–2017 гг. занимали 2-е или 3-е место среди общего количества заболеваний в Крыму. Количество таких заболеваний в последние годы продолжает расти (>76 тыс. впервые зафиксированных случаев в 2019 г.), что напрямую связывается с санитарно-гидрохимическими показателями качества воды [4]. Также остается под вопросом и физиологическая полноценность употребляемой для хозяйственно-питьевых целей воды во многих районах Крыма [13] — возможно, не самая актуальная, но, тем не менее, важная на сегодняшний день проблема, вызванная неоптимальным соотношением компонентов солевого состава. Она требует отдельного рассмотрения, в том числе в свете

предлагаемых к реализации проектов по обессоливанию морской воды и ее использованию в целях хозяйственно-питьевого водоснабжения. В случае производства такой воды в промышленных масштабах очевидны не только негативные последствия для окружающей среды при утилизации высокоминерализованных отходов водоподготовки, но и определенные сложности с дальнейшим кондиционированием обессоленной воды и оптимизацией ее потребительских свойств.

Помимо природных факторов, высокому загрязнению водных объектов способствует антропогенная деятельность. Среди ведущих причин загрязнения поверхностных вод некоторые исследователей [18] выделяют поступление загрязняющих веществ с хозяйственно-бытовыми сточными водами, включая неконтролируемые стоки, поступление загрязнений с сельхозугодий и приусадебных участков, смыв с территории водосборов при стокообразующих осадках. В последнем случае в явном виде подразумевается диффузное загрязнение, влияние которого в последние годы начинает все больше признаваться, в том числе исполнительными органами власти Республики Крым. В официальных отчетных документах указываются “неорганизованные” источники загрязнения и процессы, включающие смыв удобрений с полей, виноградников и пастбищ, аварии канализационных систем, несанкционированный сброс нечистот из частного жилого сектора в отсутствие централизованного сбора и очистки стоков в сельской местности [10]. Нерациональное использование водоемов часто приводит к их иссушению и загрязнению отходами животноводства и растительными остатками [24].

Анализ результатов гидрохимического мониторинга [9, 10] показывает, что реки Крыма практически повсеместно загрязнены тяжелыми металлами, в частности свинцом, кадмием и медью, концентрации которых существенно превышают рыбохозяйственные ПДК. Особенно высокие их концентрации наблюдаются в пределах селитебных территорий и ниже мест сбросов с очистных сооружений канализации. В длительные периоды без дождей загрязнение рек растет, особенно в приустьевых створах. Не редки случаи загрязнения рек нитратами и ионами аммония, вероятно, имеющего смешанное происхождение — в результате сбросов неочищенных сточных вод и поступления сельскохозяйственных стоков.

Многие проблемы качества воды связаны с эрозией почвы, масштабным автодорожным строительством, ведущимся на полуострове в последние годы, а также с высоким загрязнением почв тяжелыми металлами, бенз(а)пиреном и нефтепродуктами, особенно вблизи полигонов ТКО, автозаправочных станций (АЗС) и вдоль ав-

томагистралей. Такие места некоторыми исследователями [2] считаются зонами экологического риска. В частности, к таким зонам авторы указанной работы относят участки Южнобережного и Севастопольского шоссе в районе Большой Ялты, отмечая высокую загрязненность ливневого стока нефтепродуктами с территории городов Ялты, Алупки, поселков Гаспра, Гурзуф и других и отсутствие локальных очистных сооружений ливневой канализации на местных АЗС. Интенсивность среднегодовой ветровой и водной эрозии почвенного покрова, приводящая к увеличению в речных водах концентраций взвешенных веществ и сорбированных на них загрязнений, оценивается величинами 1.8–5.3 т/га в Северном Крыму, 12–15 т/га – в Северо-западном и Западном Крыму, а также на Керченском п-ове, до 16–22 т/га в предгорном и до 46.5 т/га в горном Крыму [11]. Прямые оценки выноса взвесей с речным стоком затруднены, поскольку створы гидрохимических наблюдений, как правило, не совпадают с гидрологическими постами.

Ясно, что решение многих из этих проблем требует нормативно-правового регулирования хозяйственной деятельности, стимулирования внедрения экологически ориентированных практик землепользования и производственных процессов, специальных водоохраных мероприятий, а также системы мониторинга, которая позволяла бы выявлять источники загрязнения и принимать своевременные меры по снижению рисков ухудшения качества воды.

В настоящее время на территории Республики Крым качество природных вод контролируется несколькими организациями, основные среди них следующие:

- 1) Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Крымское УГМС) – федеральное учреждение, осуществляющее мониторинг рек и водохранилищ;
- 2) Центр лабораторного анализа и технических измерений (ЦЛАТИ), подведомственное Министерству экологии и природных ресурсов Республики Крым и выполняющее контроль качества воды крымских рек по специально утвержденной программе в точках, расположенных выше и ниже основных выпусков сточных вод, артезианских скважинах и родниках;
- 3) Крымская гидро-геолого-мелиоративная экспедиция (Крымская ГГМЭ), находится в ведении Госкомводхоза; учреждение осуществляет мониторинг качества воды в местах, приуроченных к основным водозаборам поверхностных вод, гидротехническим сооружениям, устьям рек, а также на оросительных каналах и нескольких водозаборах подземных вод;
- 4) Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Крым и городе федерального значения Се-

вастополе – федеральное учреждение, контролирующее качество воды в тех поверхностных водных объектах, которые являются источниками централизованного питьевого водоснабжения.

Кроме того, ведомственный мониторинг осуществляют крымская водоснабжающая компания “Вода Крыма” и Водоканал Южного берега Крыма.

Несмотря на отсутствие единой базы данных и разные задачи перечисленных выше субъектов мониторинга, координация их деятельности в рамках работы Межведомственной комиссии при Совете министров Республики Крым по вопросам мониторинга окружающей среды позволяет получить общую картину состояния и загрязнения водных объектов. Однако, несмотря на все усилия, оперативное выявление и устранение источников загрязнения, особенно диффузных, на сегодняшний день остается практически недостижимым результатом и требует разработки отдельных подходов и программ.

Сложные условия формирования стока и качества воды, широкое распространение карста и, как следствие, несовпадение поверхностных и подземных границ речных водосборов усложняет задачи установления границ зон со специальным водоохраным статусом, требующих учета местной специфики. В этом отношении необходимо очень внимательно относиться к хозяйственному освоению (например, при развитии туристско-рекреационного комплекса) горных массивов и крымских яйл (областей формирования поверхностного и подземного стока), устанавливать ограничения на антропогенное преобразование природных ландшафтов, поддерживать природоохраный режим территорий, особенно там, где они тяготеют к верховьям рек и выходам грунтовых и карстовых вод.

Карстовые источники, дающие в целом воды высокого качества, – чувствительные индикаторы загрязнения водосборных территорий органическими соединениями и бактериями в результате влияния пастбищного животноводства и рекреационной деятельности на вершинах гор Главной и Внутренней куэстовых гряд [7, 26, 27]. Слабая защищенность аллювиальных и карстовых водоносных горизонтов, недостаточность научного обоснования зон санитарной охраны водозаборов подземных вод, формирование неконтролируемых очагов загрязнений – причины бактериального, нитратного и иного загрязнения подземных вод в районах Симферополя, Севастополя, Ялты, Алушты и др. [17].

Таким образом, в условиях интенсивной антропогенной нагрузки на водные объекты Крыма, осложняемых особенностями гидрологического режима, засушливостью климата и общим недостатком водных ресурсов на полуострове,

современное состояние зон санитарной охраны поверхностных вод и подземных источников требует пристального внимания; тем более, что последние весьма уязвимы в результате развития карста, техническое состояние водозаборных сооружений (обсадных колонн, запорной арматуры и пр.) нередко неудовлетворительно, а технические паспорта на артезианские скважины подчас отсутствуют.

УГРОЗА НАВОДНЕНИЙ И ПАВОДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Разнообразие ландшафтов, контрастность природных условий и их пространственно-временная изменчивость способствуют проявлению опасных природных процессов на территории Крымского п-ова, в том числе и наводнений. Не все они являются катастрофическими. В целом можно говорить об относительно небольшом риске природных катастроф в Крыму. Из всего набора опасных процессов, которые наблюдаются на полуострове, наибольшую опасность могут представлять наводнения, сели, оползни, карстовые процессы, просадки, землетрясения, осыпи, абразия, эрозия.

Крымские реки в условиях засушливого климата и незначительного годового количества осадков характеризуются маловодностью и не создают таких угроз, как крупные реки. Однако паводочный режим крымских рек почти ежегодно создает предпосылки для опасных подъемов уровня воды, что может привести к рискам для жизни людей и к экономическим потерям. Риски как самих наводнений, так и значительности наносимого ими ущерба в Крыму в основном создаются человеческим фактором — активными действиями людей: созданием преград (в частности мостов) для прохождения воды при высоких паводках, ускорением заиления рек и зарастания их русел в случае значительных объемов забора воды при недостаточных усилиях по расчистке и дноуглублению, застройкой речных пойм и др.

Мощные циклоны, обрушившиеся на Крым летом 2021 г., привели к затоплению части городов на полуострове. Сначала затопило Керчь, потом ливни добрались до Ялты, вызвав выход рек из берегов и затопление улиц и домов. В Ялте один человек погиб и более 40 пострадало. Многолетние наблюдения показывают, что подобная ситуация случается в Крыму чаще одного раза в сто лет, а примерно такие же осадки выпадают каждые ~10 лет.

По данным, полученным из [1, 15], в Крыму в результате резкого подъема воды было подтоплено 43 населенных пункта в шести муниципальных образованиях. В зону подтопления попали 524 частных жилых дома, 136 многоквартирных

домов и 74 социально значимых объекта. Повреждено 30 мостов, а также участки автомобильных дорог общей протяженностью >72 км. В результате пострадали 4082 человека, из них 59 человек получили травмы, двое погибли, один человек числится пропавшим без вести. Еще 867 человек частично лишились имущества, а 1692 местных жителя потеряли все. Среди нуждающихся в материальной поддержке от властей сразу оказались почти 3500 человек. На устранение последствий наводнения потребовались огромные средства — 272 млн руб. По оценкам экспертов, общий ущерб составил 4.7 млрд руб. Но эти цифры не окончательные, подсчет убытков продолжается, руководство Республики Крым определяет ущерб на общую сумму 12 млрд руб. И, очевидно, это не окончательная сумма.

По мнению экспертов, власти не занимались расчисткой русел рек городов Керчи и Ялты, поэтому они плотно заросли деревьями и кустарником. Создались условия обманчивой засухи, и поэтому реки казались полностью безопасными. Кроме того, федеральные средства, выделенные на благоустройство водостоков (например, нижнего течения р. Качи) были, по-видимому, использованы на другие цели.

Для г. Керчи причиной катастрофических событий стал также прорыв земляных плотин за городом в верховьях р. Мелек-Чесме. За состоянием этих плотин, включая намечавшиеся признаки размыва, несколько лет никто не следил, а с 2018 г. часть из них вообще была разрушена из-за строительства железнодорожной ветки от моста через Керченский пролив до ст. Багерovo. Паводковая волна, прорвав одну из оставшихся плотин, снесла остальные и пошла в центр города [21].

Для г. Ялты одной из существенных причин катастрофы в последние годы стала застройка элитным жильем пригородов над объездной дорогой, в долинах Учан-Су и Дерекойки.

Крайне неблагоприятный фактор для риска наводнений — бессистемная застройка, которая происходила в Крыму в 1990-е гг. и продолжается до настоящего времени. На полуострове очень высок износ сетей, как мелиоративных, так жилищно-коммунальных, все они были построены более 50 лет назад и с тех пор капитально не ремонтировались. Наконец, климатические изменения вряд ли снизят риск наводнений, скорее всего — они увеличат его. Крым находится в пяти климатических зонах — это сложный регион, и регулирование водопользования, предвидение и учет гидрологических последствий хозяйственной и иной деятельности, управление соответствующими рисками, в том числе и обусловливаемыми происходящими климатическими изменениями, требуют весьма серьезных усилий и

вложений, обязательно с опорой на научный анализ.

Последствия наводнений, подобных случившемуся в 2021 г., для Крыма могут быть как краткосрочными, так и долгосрочными. К первым относятся загрязнение рек и водохранилищ паводковыми водами, разрушение могильников, свалок и других экологически опасных сооружений, обнажение объектов накопленного экологического вреда. Возможны вспышки инфекций из-за вымывания могильников. Из долгосрочных последствий (особенно для Ялты) возможен размыв и постепенное разрушение берегов рек и ручьев, что приводит к активизации старых оползней и появлению новых. Эти процессы могут затронуть новостройки в микрорайонах, санаторные и рекреационные комплексы, их коммуникации, водопроводы и газопроводы. Меры, которые следует предпринимать для предотвращения или хотя бы ослабления таких угроз, давно и хорошо известны. Необходимо следующее:

регулярно и тщательно чистить русла рек, соблюдая при этом все правила охраны экосистем и поддержания экологического равновесия;

непрерывное мониторинговое состояние противоползневых комплексов — стен, дренажей, водостоків и других инженерных конструкций;

езде, где требуется, сооружать системы ливневой канализации и постоянно заботиться об их состоянии;

тщательно контролировать состояние дамб, особенно там, где есть каскады плотин;

непрерывно мониторировать уровень грунтовых вод в паводкоопасных районах, даже тогда, когда гидрометеопрогнозы не предвещают скорого выпадения осадков;

в паводкоопасных районах при строительстве фундаментов обращать особое внимание на водоотведение и противоползневые сооружения;

обеспечить безупречную работу служб оповещения об угрозах наводнений;

постоянно совершенствовать гидрометеопрогнозы на основе новых научных разработок, технического развития наблюдательной сети.

Конечно, люди, пострадавшие от природных катастроф, не остаются без помощи государства. Но очень важно и страхование рисков потерь имущества из-за природной стихии, развитие этого сектора финансового рынка. В Крыму, как и в России в целом, возникает потребность в муниципальных программах добровольного страхования жилья от рисков природных катастроф. Очевидно, они могли бы оживить рынок и снизить риски новых потерь, которые могут возникнуть с изменением климата. Известно, что на территории Российской Федерации наводнения в ряду стихийных бедствий занимают первое место

по повторяемости, плотности распространения и суммарному среднегодовому социально-экономическому ущербу. Согласно данным авторов статьи, среднемноголетний социально-экономический ущерб от наводнений в России составляет ~3 млрд долларов в год.

Для оценки экономического ущерба от наводнения необходима в первую очередь информация о степени опасности (интенсивности) процесса и об уязвимости объекта. Затем проводится расчет экономического ущерба, причиняемого реципиентам наводнениями. При этом для подтопления, нагонов, затоплений используются разные формулы. Поскольку объектами опасности могут быть жилые здания, сельскохозяйственные угодья и прочее, то при оценке ущерба они разделяются на 2 группы: для зданий и сооружений приводятся формулы расчета ущерба на основе оценки риска, для других объектов опасности — формулы прямого подсчета ущерба по его составляющим [19, 20].

Разработаны и предложены страховые индексы территорий [16]. Страховые индексы территории отражают: 1) принадлежность территории к определенному типу или типам характеристических инженерно-геологических массивов; 2) оценку социально-экономического риска от проявления опасных природных процессов, развитых на рассматриваемой территории. В свою очередь, типы характеристических инженерно-геологических массивов описываются определенным рельефом, характерным парагенезисом горных пород, тектонической структурой, сейсмотектоническим режимом, температурно-влажностным режимом грунтовой толщи, а оценка риска проводится с учетом уязвимости двух категорий — населения и промышленности. Страховые индексы позволяют выделить экономические регионы по приоритетам страхования в зависимости от наиболее ущербобразующих процессов, характерных для данного региона.

Объем страховых вложений в каждом экономическом районе зависит от многих факторов: природных, техногенных и социальных, которые достаточно полно отражены в предложенном страховом индексе.

Развитие страхования от наводнений будет способствовать предотвращению расширения стихийного явления до масштабов стихийного бедствия и чрезвычайной ситуации. Страховые фонды должны быть достаточно велики, чтобы предотвращать катастрофическое развитие наводнения, нарушающее нормальное функционирование социально-экономической сферы. В перспективе страхование от наводнений должно стать составной частью механизма управления безопасностью жизни и деятельности человека.

Анализируя опыт проведения страхования от наводнений, следует сделать следующие выводы.

1. В Крыму, как и в России в целом, до сих пор еще не принята Правительственная программа страхования от наводнений. Она составлена и находится в стадии бесконечного обсуждения. Трудно рассчитывать, что в современных условиях она будет финансироваться.

2. Страховой рынок в Крыму находится в стадии формирования, существовавшее ранее страхование не занималось проблемой страхования от опасных природных процессов, в том числе и наводнений. При возникновении чрезвычайных ситуаций Правительство целенаправленно выделяло средства на ликвидацию их последствий. Эти средства не могли полностью компенсировать причиненный ущерб.

3. Поменявшаяся за последние годы ситуация и развитие еще слабого страхового рынка позволяют надеяться, что страховщики обратят внимание на страхование от опасных процессов и будут принимать на себя эти риски, работая вместе с учеными различных специальностей.

4. Основные источники смягчения последствий наводнений на сегодняшний день следующие: федеральная помощь, заключающаяся в разработке и издании нормативно-правовых актов, контроль за их соблюдением; федеральный резервный фонд, оказывающий срочную поддержку при наиболее тяжелых по последствиям событиях, возложение же основной финансовой ответственности за возмещение ущерба на федеральный резервный фонд, как в России часто практиковалось, — несправедливо и неэффективно, хотя именно эта помощь остается до сих пор основным компенсирующим механизмом; развитие системы государственного и частного страхования и перестрахования с обязательным строго контролируемым направлением части средств на превентивные мероприятия.

В качестве основных препятствий развития системы страхования от наводнений следует отметить: ограниченность и часто недоступность данных для предсказания наводнения, достаточно большие интервалы между происходящими явлениями, ошибки в прогнозировании времени, места и интенсивности наводнения, огромная величина ущерба от наводнения, трудности с расчетом страховых ставок.

Наводнения, как отмечалось, — не единственный вид стихийных явлений, способных обрести черты стихийного бедствия в Крыму. Другое важное направление развития страхования определяют засухи. Но специфика страхования от рисков засух совсем иная, чем в случае наводнений. Прежде всего, в развитых странах сфера риска при засухе практически полностью ограничена экономикой, и если социальный фактор здесь то-

же присутствует, то он относительно легко сводится к экономическим показателям (чего нельзя сказать о наводнениях, оползнях, землетрясениях). При всей развитости теории страхования, включая актуарный анализ, ставший, по сути, прикладной математической дисциплиной, здесь еще многое предстоит разработать и опробовать на практике, особенно с учетом специфики Крыма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа современных данных о водных ресурсах Крымского п-ова, их использовании, состоянии водного хозяйства, возможностях разведки новых месторождений подземных вод и использования методов рациональной эксплуатации действующих — выдвинута научная гипотеза о том, что собственные водные ресурсы Крыма достаточны для удовлетворения потребностей населения и развивающейся экономики в пресной воде. Дальнейшие исследования будут направлены на конструктивное подтверждение этой гипотезы. Конечная их цель — построение научной основы для создания системы интегрированного управления водными ресурсами, модернизации водного хозяйства Крыма, регулирования качества воды в природных источниках и управления рисками наводнений и других водобусловленных стихийных бедствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бадина С.В., Панкратов А.А.* Уязвимость населения и экономики муниципальных образований туристического региона к природным опасностям // *Материалы III международ. науч.-практ. конф. “Рекреационная география и тренды развития туризма”*. Иркутск: ИГ СО РАН, 2021. С. 58–62.
2. *Ветрова Н.М., Иваненко Т.А., Гайсарова А.А., Меньшиков Э.Э.* Проблемы зон экологического риска на приморских территориях Крыма // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2019. № 2 (26). С. 59–73. <https://doi.org/10.21869/23-11-1518-2019-26-2-59-73>
3. Государственный доклад “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе в 2017 году”. 2018. [Электронный ресурс]. <http://82.rospotrebnadzor.ru/documents/Gosdoklad/> (дата обращения 02.01.2022)
4. Государственный доклад “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе в 2020 году”. 2021. [Электронный ресурс]. <http://82.rospotrebnadzor.ru/documents/Gosdoklad/> (дата обращения 02.01.2022)
5. *Гусев Е.М., Джоган Л.Я., Насонова О.Н.* Водная безопасность Степного Крыма и возможные пути ее повышения // *Вод. ресурсы*. 2022. № 4. С. 383–396.

6. Демин А.П., Зайцева А.В., Харламов М.А. Водопотребление и водоотведение в муниципальных образованиях Республики Крым и г. Севастополь: современное состояние и проблемы // Вод. ресурсы. 2022. № 4. С. 397–408.
7. Джамалов Р.Г., Егоров Ф.Б., Сафронова Т.И. Ресурсы подземных вод и их роль в водоснабжении Крыма // Вод. ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 596–602. <https://doi.org/10.1134/S0321059618060056>
8. Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И., Егоров Ф.Б. Ресурсы подземных вод Крыма // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. Сб. науч. тр., посвящ. Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН. Сочи: Лик, 2017. С. 66–71.
9. Доклад о состоянии и охране окружающей среды в 2019 г. 2020. [Электронный ресурс]. <https://meco.rk.gov.ru/ru/structure/60> (дата обращения: 21.12.2021)
10. Доклад о состоянии и охране окружающей среды в 2020 г. 2021. [Электронный ресурс]. <https://meco.rk.gov.ru/ru/structure/60> (дата обращения: 21.12.2021)
11. Ергина Е.И., Жук В.О. Региональные особенности проявления эрозии на территории Крымского полуострова // Актуальные проблемы устойчивого развития агроэкосистем (почвенные, экологические, биоценологические аспекты). Материалы докл. Всерос. науч. конф. с международ. участием, посв. 60-летию лаборатории агроэкологии Никитского ботанического сада. Симферополь: АРИАЛ, 2019. С. 38–41.
12. Иванютин Н.М., Подовалова С.В. Изучение пригодности водных ресурсов юго-восточного Крыма для питьевых нужд // Экология и строительство. 2018. № 2. С. 4–10. <https://doi.org/10.24411/2413-8452-2018-10001>
13. Иванютин Н.М., Подовалова С.В. Физиологическая полноценность питьевых вод Крыма по химическому составу // Системы контроля окружающей среды. 2018. № 13 (33). С. 140–146.
14. Кобечинская В.Г., Ярош О.Б., Ивашов А.В., Апостолов В.Л. Проблемы качества питьевой воды западной части Крыма // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 3 (83). С. 50–62. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.3.50-62>
15. Комсомольская правда. “Библейский потоп” в Крыму признан ЧС федерального масштаба. 13.08.2021. [Электронный ресурс]. <https://www.crimea.kp.ru/daily/28317.5/4459072/> (дата обращения 13.01.2022)
16. Кофф Г.Л., Чеснокова И.В. Информационное обеспечение страхования от опасных природных процессов. М.: ПОЛТЕКС, 1998. 168 с.
17. Лущик А.В., Горбатюк Н.В., Морозов В.И. Водоотбор и его влияние на подземные воды, пригодные для хозяйственно-питьевого водоснабжения в Крыму // Строительство и техногенная безопасность. 2016. № 2 (54). С. 83–91.
18. Миньковская Р.Я., Ингеров А.В. Гидрохимическая характеристика рек Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 22. С. 265–281.
19. Порфирьев Б.Н. Экономические последствия катастрофического наводнения на Дальнем Востоке в 2013 году // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 2. С. 128–137.
20. Порфирьев Б.Н., Макарова Е.А. Экономическая оценка ущерба от природных бедствий и катастроф // Вестн. РАН. 2014. Т. 84. № 12. С. 1059–1072.
21. Почему затопило Ялту и Керчь – мнение ученого // РИА Новости Крым. 26.06.2021. [Электронный ресурс] <https://crimea.ria.ru/20210626/Pochemu-zatopilo-Yaltu-i-Kerch-mnenie-uchenogo-1119728850.html> (дата обращения 13.01.2022)
22. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Т. 6. Украина и Молдавия / Под ред. М.М. Айзенберга, М.С. Каганера. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 344 с.
23. Роспотребнадзор информирует о качестве питьевой воды в Республике Крым и г. Севастополе за первое полугодие 2021 года. [Электронный ресурс]. <http://82.rospotrebнадзор.ru/directions/nadzor/148939/> (дата обращения 22.12.2021)
24. Свергузова С.В., Кучерова Ю.О. Влияние сточных вод на здоровье человека и окружающую среду в Крыму // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. Всерос. науч. конф. Белгород: БГТУ, 2019. С. 270–275.
25. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейнов рек Республики Крым. Кн. 1. Общая характеристика речных бассейнов, расположенных на территории Республики Крым. 2017. [Электронный ресурс]. <https://gkvod.rk.gov.ru/ru/structure/697> (дата обращения 22.12.2021)
26. Тарасенко В.С., Паштейцкий В.С., Ляшевский В.И., Панютин В.М., Резников С.В., Тимченко З.В. Экологические проблемы водохозяйственного комплекса Украины и Крыма // Таврический вестн. аграрной науки. 2013. № 1. С. 115–119.
27. Токарев С.В. Уязвимость карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование. Дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь: КФУ, 2020. 186 с.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 504.4.062.2

**РАЦИОНАЛЬНОЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В РЕСПУБЛИКЕ КРЫМ:
ЗНАЧЕНИЕ, ОГРАНИЧЕНИЯ, ПОДХОДЫ К ДОСТИЖЕНИЮ¹****© 2022 г. Н. Е. Волкова^a, Н. М. Иванютин^{a, b, *}, В. С. Тарасенко^a,
В. С. Паштецкий^a, С. В. Подовалова^a**^aНаучно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма,
Симферополь, 295043 Россия^bИнститут водных проблем Российской академии наук,
Москва, 119333 Россия

*e-mail: redkolya@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 20.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Усиление дефицита водных ресурсов в Республике Крым подчеркнуло необходимость их рационального использования. Так как основа этого – правильно организованная водная политика, в ходе исследования был проведен анализ основных нормативно-правовых и законодательных документов, регламентирующих водохозяйственную деятельность в Крымском регионе, выделены их недостатки и на основе обзора мировых разработок в сфере повышения эколого-экономической эффективности водопользования разработаны предложения по достижению рационального использования водоресурсного потенциала. Исходя из опыта зарубежных стран, для Республики Крым перспективно внедрение концепции интегрированного управления водными ресурсами. Реализация данного подхода потребует проведения ряда преобразований, к которым относятся: изменения в структуре управления водными ресурсами; усовершенствование нормативно-правовой и научно-методологической базы; введение жесткого контроля за водоотбором; вовлечение в процесс водопользования всех имеющихся источников воды, включая ограниченно пригодные; подготовку высоко квалифицированных специалистов для работы с современным программным обеспечением и компьютерными технологиями (ГИС-инструментарий, гидрологические модели) и т. п.

Ключевые слова: рациональное водопользование, дефицит водных ресурсов, нормативно-правовая база, экономические механизмы, интегрированное управление водными ресурсами.

DOI: 10.31857/S0321059622040198

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное водопользование – это комплекс мер, обуславливающий эффективное использование всех имеющихся водных ресурсов с учетом экономической, социальной и экологической составляющих [5, 8]. Его реализация на практике предполагает достижение баланса между социально-экономическими потребностями общества и поддержанием благоприятной экологической обстановки на водных объектах. Особое значение достижение рационального водопользования имеет для регионов с дефицитом водных ресурсов, в том числе и для Республики Крым (РК).

Перекрытие внешнего водоисточника в Крым не только повлекло за собой усиление дефицита

водных ресурсов, которое наиболее негативно отразилось на сельском хозяйстве (рис. 1), но и повлияло на ухудшение экологической обстановки на водных объектах. Так, к примеру, из-за засушливых условий в 2019–2020 гг. из Симферопольского и Балановского водохранилищ не осуществлялись экологические попуски. Это повлияло не только на объем стока на участках рек ниже по течению, но и на качество водных ресурсов. Так в 2017 г., когда из Симферопольского водохранилища был осуществлен сброс в объеме 13.1 млн м³, индекс загрязнения воды в ближайшем наблюдательном пункте государственной мониторинговой сети (рассчитан по данным Центра лабораторного анализа и технических измерений) составил 0.33, а в 2019 и 2020 гг. – 0.84 и 0.7 соответственно.

Основа достижения рационального водопользования – правильно организованная водная политика. По мнению ведущих специалистов и

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания НИИСХ Крыма (государственная регистрация АААА-А16-116022610115-4); Государственного задания ИВП РАН (тема 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9).

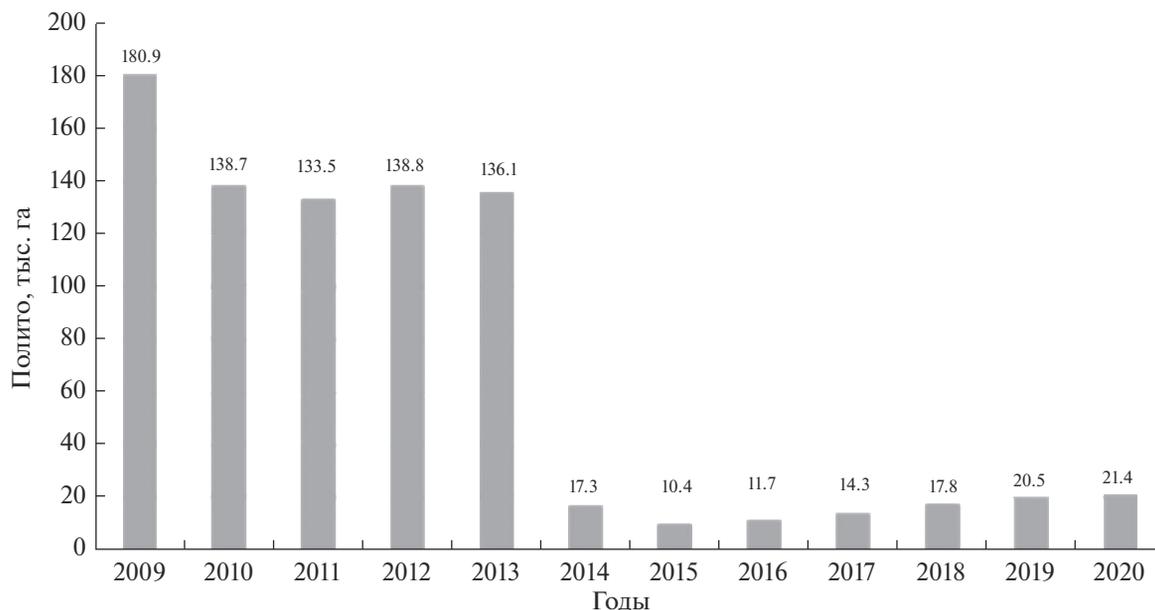


Рис. 1. Динамика площадей политых земель в Республике Крым за 2009–2020 гг.

ученых водного сектора, действующая на территории РФ система законодательных и нормативно-правовых документов, регламентирующих организацию и ведение водохозяйственной деятельности, имеет ряд недостатков (несогласованность, наличие фактически невыполнимых/завышенных требований, дублирование действий, несоответствие научно-методического уровня ряда актов практическим задачам их использования и др.), которые целесообразно устранить (табл. 1). Именно такой вывод сделан в работах [2–4, 9, 10, 19, 20] и др. В табл. 1 приведены основные нормативно-методические документы, регламентирующие ведение водохозяйственной деятельности, которые, по мнению авторов указанных статей, целесообразно пересмотреть и усовершенствовать.

Следует отметить, что в российском законодательстве недостаточно полно проработаны механизмы устранения/снижения негативных последствий дефицита водных ресурсов. Это обосновано тем, что Россия относится к водообеспеченным странам мира и по объему формирующегося речного стока занимает второе место после Бразилии [7]. Это оказало влияние на организацию и ведение водохозяйственной деятельности, включая разработку регламентирующей ее нормативно-правовой базы (основное внимание уделено решению проблемы негативного воздействия антропогенной деятельности на экологическое состояние водных объектов).

Крым возглавляет десятку наименее обеспеченных водой регионов РФ (рис. 2). На одного жителя полуострова приходится в среднем

0.5 тыс. м³/год, что в 58 раз меньше среднего значения по России [7]. Вместе с недостатками законодательной и нормативно-правовой базы РФ это привело к ряду проблем, сдерживающих достижение рационального водопользования в Республике Крым.

Исходя из вышеизложенного, цель исследования – проанализировать основные нормативно-законодательные акты, регламентирующие ведение водохозяйственной деятельности в РК, выделить их недостатки и на основе мирового опыта разработать предложения по достижению рационального водопользования в регионе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим основные законодательные и нормативно-правовые документы, регламентирующие ведение водохозяйственной деятельности в Крымском регионе.

Закон “О регулировании водных отношений в Республике Крым”

Закон “О регулировании водных отношений в Республике Крым” принят в 2014 г. и включает в себя правила регулирования водных отношений в регионе, а именно: полномочия, закрепленные за государственными структурами различного уровня; порядок назначения ставок за использование водных объектов; создание бассейновых советов; основные цели ведения государственного мониторинга за качественными и количественными

Таблица 1. Нормативно-методические акты водного законодательства РФ, требующие редакции (перечень составлен на основе обобщения выводов, приведенных в [2–4, 9, 10, 19, 20])

Наименование документа	Основные недостатки
Методические указания по разработке схем комплексного использования и охраны водных объектов	Концепция СКИОВО, разработана в 1980-е гг. и не учитывает возможность использования современных достижений, к примеру в сфере цифровых технологий; отсутствует увязка с социально-экономическими программами развития территорий; не раскрыты ключевые понятия: допустимая и фактическая антропогенные нагрузки и др.
Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты	Не предусмотрен механизм доведения норм допустимого воздействия до предприятий; не решена задача формулировки расчетного алгоритма; применяется идея о “нерегулируемых антропогенных источниках загрязняющих веществ”, к которым относят большинство хозяйственных объектов
Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей	В основу заложены требования, не соотносящиеся с современными технологическими возможностями очистки; отсутствует связь с нормативами допустимого воздействия; завышенное количество согласующих инстанций
Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства	Основы расчетов, заложенных в методику, научно недостаточно обоснованы
Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям (УКИЗВ)	по достоверности получаемые результаты значительно уступают современным методам оценки, к примеру – индикационной гидробиологии

характеристиками водных ресурсов; требования по охране подземных водоисточников [12]. В данном акте не приведена процедура согласования на уровне межведомственного взаимодействия; среди полномочий органов власти, включая органы местного самоуправления, не зафиксирована необходимость информирования населения о состоянии водных объектов. Это ведет к дублированию ряда функций; разрозненности информационных данных, составляющих базу для разработки управленческих решений; отсутствию понимания у жителей Крыма фактической обстановки на водных объектах и, как следствие, заинтересованности в бережном отношении к воде. К примеру, мониторинговые наблюдения за качеством поверхностных вод в РК проводят три организации: Центр лабораторного анализа и технических измерений, Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (КУГМС); Крымская гидрогеолого-мелиоративная экспедиция. Места расположения ряда наблюдательных пунктов фактически совпадают (табл. 2), что свидетельствует о несогласованности действий между организациями.

Из анализа табл. 2 видно, что результаты оценки, выполненной по осредненным годовым данным, различаются. Это обосновано тем, что спе-

циалисты КУГМС не определяют содержание Mn, Ni, Pb, Cd, хотя концентрация этих загрязняющих веществ часто превышает значения ПДК.

*“О создании бассейнового совета
Крымского бассейнового округа”*

Приказ Федерального агентства водных ресурсов “О создании бассейнового совета Крымского бассейнового округа” утвержден в сентябре 2017 г. [18]. Этот правовой акт регламентирует создание на территории Крымского региона бассейнового совета с обозначением ответственного за его функционирование государственного органа власти (Совет Министров Республики Крым) и включает в себя его количественный и персональный состав. Следует отметить, что в соответствии со ст. 29 Водного кодекса РФ данные органы создаются для разработки “рекомендаций в области использования и охраны водных объектов в границах бассейнового округа” [6]. Однако на практике вместо создания площадки для согласования интересов различных ведомств, водопользователей и общественности проводится обсуждение принимаемых управленческих решений.

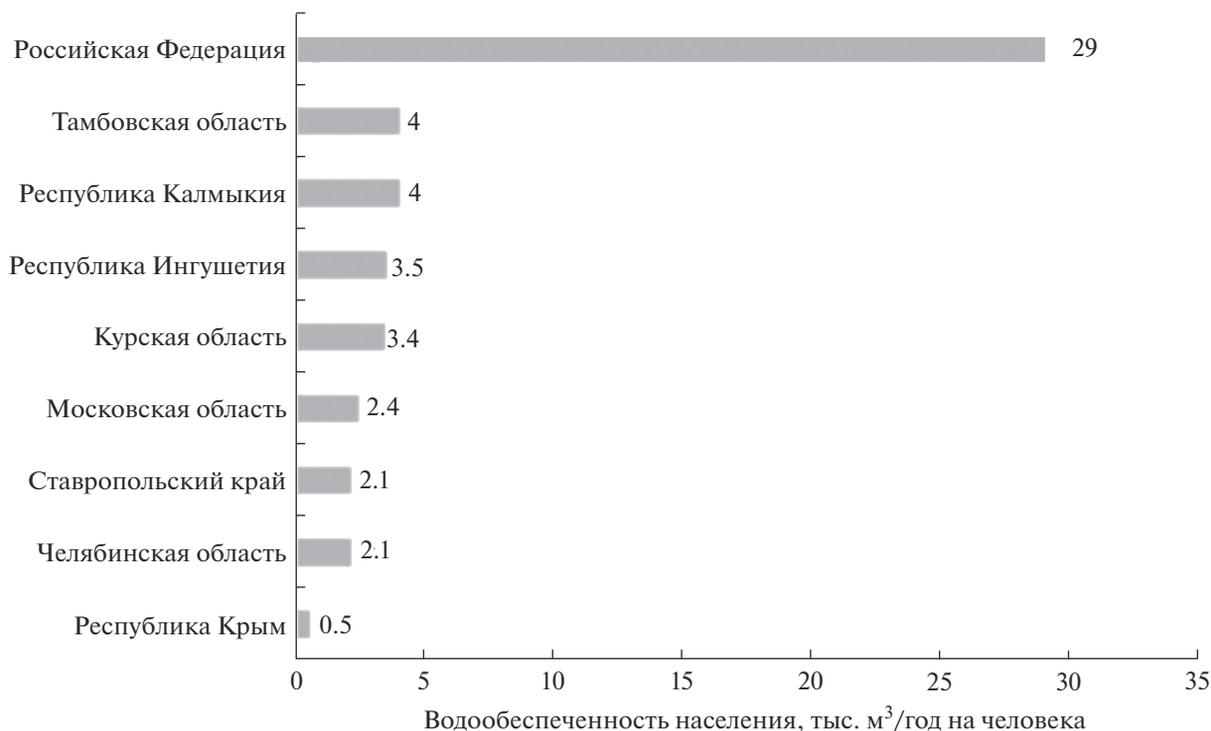


Рис. 2. Водообеспеченность регионов Российской Федерации.

Проект “Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейнов рек Республики Крым”

В соответствии с Водным кодексом РФ “Схема комплексного использования и охраны водных объектов” (СКИОВО) — основополагающий документ по разработке перечня водохозяйственных мероприятий на водных объектах, расположенных в границах речных бассейнов. Для Крыма подготовку СКИОВО выполнила компания “ВЕД” [23]. Следует отметить, что по состоянию на 01.09.2021 г. проект не утвержден. Данный документ состоит из семи книг и “Проекта нормативов допустимого воздействия на водные объекты, расположенные на территории Республики

Крым”. Он содержит следующую информацию: о современном и перспективном состоянии бассейнов рек; о результатах оценки экологической обстановки; о наличии и доступности водных ресурсов; о техническом состоянии сооружений водохозяйственной инфраструктуры; перечень ключевых проблем, характерных для водного хозяйства Крыма, и ряд проработанных предложений по достижению рационального водопользования [23]. Однако проект имеет и ряд недостатков, среди которых следует выделить следующие:

использование двух подходов в подаче информации (по водохозяйственным участкам и административно-территориальным единицам) затрудняет проведение анализа, основанного на

Таблица 2. Результаты оценки качества водных ресурсов по показателю УКИЗВ в дублирующихся пунктах мониторинговой сети по данным 2019 г.

Место расположения точек наблюдения	Результаты оценки		
	ЦЛАТИ	КУГМС	КГГМЭ
Аянское водохранилище	—	1 условно чистая	3а загрязненная
Симферопольское водохранилище	—	2 слабо загрязненная	3а загрязненная
р. Салгир,	4в очень грязная	4а грязная	4в очень грязная
с. Двуречье, Нижнегорский район	4а грязная	3б очень загрязненная	—
р. Малый Салгир, г. Симферополь, парк им. Ю.А. Гагарина	3б очень загрязненная	2 слабо загрязненная	—
р. Биюк-Карасу, Шоссе Белогорск — Золотое поле			

сопоставлении данных, отражающих уровень антропогенной нагрузки, оказываемой на водные объекты (к примеру, распределение земельного фонда приведено только по районам, что затрудняет оценку такого показателя, как сельскохозяйственная освоенность водосборной территории рек, объединенных в водохозяйственные участки, хотя во второй книге к основным источникам загрязнения водных объектов отнесены стоки с агроландшафтов);

в основном приведен анализ фактической ситуации, в должном объеме не уделено внимание причинам развития неблагоприятных экологических процессов (к примеру, среди источников загрязнения водных объектов детально рассматриваются только официальные точки сброса сточных вод);

при описании действующей сети государственного мониторинга экологического состояния поверхностных вод указаны не все организации, осуществляющие наблюдения; эта неточность повлияла на значение установленного целевого показателя, характеризующего эффективность работы системы мониторинга, включая оптимизацию количества и схему размещения пунктов наблюдения;

для решения проблемы дефицита водных ресурсов предложен ряд крупномасштабных, дорогостоящих мероприятий (переброска стока р. Кубани, строительство атомного опреснительного комплекса), а в ходе их обоснования доказано, что с экономической точки зрения такие решения нецелесообразны; таким образом, не уделено должного внимания решению одной из основных проблем Крыма – дефициту водных ресурсов;

в расчет принят длительный промежуток времени (15 лет), что в свою очередь предполагает, что влияние произошедших за этот период событий, включая результаты реализации запланированных мероприятий, не будет учтено, хотя это может потребовать внесения существенных корректировок в проект СКИОВО. Особенно это касается решения проблем дефицита водных ресурсов и негативного воздействия вод на окружающую среду.

Постановление “Об утверждении единой схемы водоснабжения и водоотведения Республики Крым”

Постановление “Об утверждении единой схемы водоснабжения и водоотведения Республики Крым” утверждено Советом министров РК 26.12.2017 и состоит из разделов “Водоснабжение” и “Водоотведение” [17].

По каждому из разделов приведена сводная информация:

о состоянии объектов централизованных систем водоснабжения и водоотведения;

по проблемам, препятствующим оказанию населению данных услуг, и мероприятиям по их устранению;

плановые показатели развития централизованных систем водоснабжения и водоотведения.

На основе этого документа по каждому населенному пункту Крыма разработаны программы комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры. Реализация “Единой схемы” позволила значительно улучшить качество услуг водоснабжения и водоотведения. Это обосновано тем, что в настоящее время за эксплуатацию основной части водопроводных и канализационных сетей отвечают крупные коммунальные предприятия (“Вода Крыма”, “Водоканал Южного берега Крыма”, “Крымская водная компания”, “Райбытсервис”). На базе крупных организаций проще контролировать качество воды, выполнять ремонтные работы, проводить мероприятия федеральных, государственных, региональных и муниципальных целевых программ развития и т. п.

Однако “Единая схема” имеет ряд недостатков, основные из них следующие:

основой разработки документа должна быть СКИОВО, однако прописанные в этих двух документах целевые и плановые показатели не всегда совпадают;

отсутствие четкой увязки с действующими и разрабатываемыми федеральными и региональными целевыми программами, включающими в себя развитие коммунальной инфраструктуры (ФЦП “Социально-экономическое развитие Республики Крым и г. Севастополя до 2025 года”, Государственная программа развития водохозяйственного комплекса Республики Крым, Региональная программа Республики Крым по повышению качества водоснабжения на 2019–2024 гг. и др.).

Экономические механизмы

Экономические механизмы, используемые в Республике Крым для регулирования водных отношений, представлены тремя категориями:

водный налог и плата за пользование;

плата за загрязнение;

штрафы за нарушение водного законодательства.

По мнению ряда специалистов водохозяйственной сферы и ведущих ученых РФ, занимающихся вопросами рационального водопользования, экономические механизмы регулирования водных отношений слабо проработаны и требуют корректировки и усовершенствования [2–4, 9, 10,

20]. Например, в работах [3, 4] указаны их следующие недостатки:

внесение платы за загрязнение и использование водных ресурсов не связано с их использованием для целей охраны и восстановления водных объектов;

нет практической возможности учета природоохранных затрат в составе осуществляемых водопользователями выплат за загрязнение;

не принимается во внимание опасность поллютанта;

отсутствует полноценная система штрафов и других мер административной и уголовной ответственности за загрязнение водных объектов и многое другое.

Также следует отметить, что в России водный налог не взимается за такой вид водопользования, как забор воды для целей орошения сельскохозяйственных угодий. Все это в своей совокупности ведет к тому, что используемые экономические механизмы регулирования водных отношений не выполняют стимулирующую роль в отношении рационального использования водных ресурсов.

Таким образом, для достижения рационального водопользования в Крыму необходимо усовершенствовать механизмы управления и охраны водных ресурсов, внедрить новые подходы и принципы в процесс ведения водохозяйственной деятельности. При решении данной задачи целесообразно опираться на опыт ведущих стран мира, которые, несмотря на нехватку собственных водных ресурсов, смогли добиться успеха в организации процесса рационального водопользования.

Опыт Израиля по достижению рационального водопользования

Наиболее успешно решена проблема дефицита водных ресурсов в Израиле, который, по мнению ряда экспертов и ученых, заслужено называют «мировым водным лидером» [1, 14, 15]. Механизмы преодоления водного кризиса, использованные в Израиле, условно можно разделить на четыре основные группы: строгий контроль за формированием и использованием водных ресурсов и планирование их распределения; нормирование водопотребления; ценообразование и льготы; эффективное использование всех источников воды, включая сточные и соленые воды.

Рассмотрим каждую группу механизмов.

Строгий контроль за формированием и использованием водных ресурсов и планирование их распределения в Израиле

Для оценки приходной части водного баланса используются данные метеорологических стан-

ций, сеть которых охватывает всю территорию страны (более 900 станций, не включая частные). Для сравнения, в Крыму, площадь которого больше Израиля в 1.3 раза, функционирует только 24 государственные метеостанции. Для контроля качественных и количественных характеристик водных ресурсов (28 речных бассейнов и 210 родников) создана масштабная сеть гидрометрических пунктов наблюдений. Кроме того, особое внимание уделяется измерению уровней и солености воды в наблюдательных и эксплуатируемых скважинах (более 1400 шт.) [14]. С 2001 по 2015 г. количество наблюдательных скважин в Крыму сократилось в 4 раза (с 513 до 130 точек наблюдения).

Все это в своей совокупности позволило создать в достаточной мере полную информационную базу для планирования работы водохозяйственного комплекса. Специалисты «Администрации управления водными ресурсами» на основе использования современных статистических моделей климата, геологических процессов фильтрации, симуляции потребления воды из оз. Кинерет дают заключение об объемах водных ресурсов, формирующихся в гидрологическом году, на основе которого регламентируется допустимый водоотбор, что оговаривается ежегодно в лицензии на водопользование.

Нормирование водопотребления в Израиле

Нормирование водопотребления – один из основных подходов к распределению воды между группами потребителей. В Израиле действует характерный для большинства стран мира, включая РФ, порядок приоритетов водопользования:

- коммунально-бытовое;
- промышленное;
- сельскохозяйственное;
- прочие виды.

Характерная особенность реализации данного механизма в Израиле – установление квот, размер которых зависит от следующих показателей:

для сельскохозяйственных водопользователей – не только от выращиваемой культуры, места расположения, типа почвы и источника воды, но и от объема производства;

для промышленных предприятий ($>5000 \text{ м}^3/\text{год}$) – от вида продукта, объема производства (в случае нарушений требований водоотведения лицензия на потребление воды не выдается).

Ценообразование и льготы в Израиле

В Израиле используют дифференцированную систему ценообразования в зависимости не только от вида деятельности, что характерно для реги-

онов РФ, но и от объема потребления, источника воды.

В сельском хозяйстве при использовании воды питьевого качества 50% объема выделенной квоты водных ресурсов оплачивается по минимальной цене (базовый тариф), на следующие 30% она увеличивается в 1.2 раза, а на оставшиеся 20% – в ~1.5 раза [22]. В случае использования очищенной сточной и минерализованной воды ее стоимость в среднем снижается на 30–50% от базового тарифа; кроме того, при этом также предусмотрен ряд дополнительных льгот в зависимости от качества используемых водных ресурсов [13]. В Крыму очищенные сточные воды, объем которых составляет 100–120 млн м³ в год, не используются.

В сфере коммунального водоснабжения действует двухставочный тариф. После превышения нормы (4 м³/мес.) стоимость каждого дополнительного кубометра воды возрастает почти в 2 раза.

В промышленности используют дифференцированную систему ценообразования. При использовании очищенных сточных и минерализованных вод тариф снижается в среднем на 15–25% в сравнении с базовым [13].

Эффективное использование всех располагаемых источников воды, включая сточные и соленые воды, в Израиле

В Израиле водосбережение считается самым надежным и наименее дорогостоящим способом повышения эффективности использования водоресурсного потенциала. Кроме выше описанных механизмов, для экономии воды в стране применены указанные ниже подходы.

Устройство национальной системы водоподачи. На ее долю приходится ~95% подаваемой питьевой воды, включая опресненные воды, под управлением государственного гидростроительного инженерного концерна “Мекорот” [29]. В отличие от Израиля, в Крыму оказанием услуг по коммунальному водоснабжению занимается большое количество частных и государственных организаций. Самые крупные из них – “Вода Крыма” и “Крымская водная компания”, на долю которых приходится ~50% обслуживаемых населенных пунктов региона.

Применение очищенных сточных вод для целей орошения. Сейчас в Израиле используется ~90% формирующихся стоков. Сточные воды проходят три цикла очистки: механическую, биологическую, природную фильтрацию в водоносные горизонты (метод искусственного пополнения запасов подземных вод) [28]. Стандарты, методы очистки и использования сточных вод разрабатывались специально созданным комитетом “Inbar” [30] и не только позволяют обеспечить безопасность их применения для людей, но и предотвра-

щают загрязнение водных ресурсов, поливаемых земель и защищают природные экосистемы.

Реализация крупномасштабных проектов государственно-частного партнерства по опреснению. В течение 15 лет, начиная с 2000 г. в Израиле были возведены пять опреснительных заводов общей производительностью 585 млн м³/год [30]. Четыре из них построены в рамках государственно-частного партнерства, что позволило снизить нагрузку на государственный бюджет. В РК в связи с усилением дефицита водных ресурсов прорабатывается вопрос о необходимости строительства опреснительных заводов для покрытия потребностей жителей городов Симферополя, Ялты, Севастополя.

Перехват поверхностного стока. Для природно-климатических условий Израиля характерно формирование наводнений, вызванных ливневыми осадками. Если этот сток не перехватывать, то он теряется в пустыне, Средиземном или Мертвом море. Для решения данной проблемы в Израиле создали сеть гидротехнических сооружений и лесонасаждений, перехватывающих сток, что позволило увеличить подпитку подземных вод в среднем на 8% [30]. В Крымском регионе данный подход также нашел широкое применение. Большинство водотоков Крымского п-ова зарегулировано плотинами, что позволяет повысить эффективность использования поверхностного стока, а в горной и предгорной зонах – бороться с эрозийными процессами, селевыми явлениями; однако реки ЮБК слабо зарегулированы, что ведет к потерям стока, формирующегося в результате выпадения ливневых осадков и таяния снега на южных склонах Крымских гор.

Использование водоносных горизонтов в качестве накопительных резервуаров. Впервые эта идея была реализована компанией “Мекорот” еще в 1960-х гг. Ее суть заключается в том, что водоносные горизонты используются как резервуары для хранения воды, пополнение которых осуществляется во влажные годы, а откачка – в засушливые. Это позволило не только перераспределить объемы формирующейся воды во времени, но и снизить потери на испарение.

Содействие селективности сельскохозяйственных культур и импорту виртуальной воды. Сущность данного подхода заключается в отказе от производства водоемких видов сельскохозяйственной продукции в пользу ее импортирования. В аграрном секторе приоритет отдан возделыванию дорогих и несезонных овощей в теплицах. Такие идеи реализуются и в Крыму. Аграрии полуострова отказались от возделывания риса, орошения зерновых, кормовых и технических культур. На орошаемых землях отдается предпочтение выращиванию плодовой и овощной продукции.

Внедрение эффективных технологий орошения.

К ним относятся: капельное и подпочвенное орошение, мини-разбрызгиватели и др. Данный подход получил широкое распространение не только в Израиле, но и во всем мире, включая Крым. В период с 2013 по 2020 г. на полуострове доля земель, орошаемых капельным способом, увеличилась с 9.4 до 67.8%.

Содействие управлению спросом за счет повышения общественной осведомленности. С 2008 по 2010 г. в Израиле прошла информационная кампания об экономном использовании воды. Итогом данной акции стало снижение на 8% городского потребления воды населением [30].

Создание благоприятных условий для внедрения инноваций в водный сектор. Для этого в Израиле создана уникальная система “университет – сельское хозяйство – промышленность”. Первые предоставляли свои наработки, вторые – площадку для их испытаний, третьи – оказывали финансовую поддержку. Результаты следующие: решение проблемы нехватки воды; дополнительный доход за счет экспорта оборудования, лицензий, услуг. В РК этот подход начал реализовываться после ее вхождения в состав РФ. Университеты стали развиваться не только как образовательные учреждения, но и как научные центры, деятельность которых направлена на достижение устойчивого социально-экономического развития региона и страны в целом.

Осуществляемая в Израиле водная политика, несмотря на жесткую централизацию управления водным сектором, позволила реализовать основополагающие принципы интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР), а именно – рассмотрение воды как уязвимого, жизненно важного для развития общества и государства ресурса и как товара, имеющего рыночную стоимость. Достигнутые результаты (улучшение экологического состояния оз. Кинерет и других водных объектов, снижение дефицита воды, развитие сельскохозяйственного производства и др.) свидетельствуют о целесообразности использования наработанного в Израиле опыта в РК.

Внедрение принципов ИУВР в Крыму

Исходя из мирового опыта можно считать, что внедрение ИУВР – перспективный концептуальный подход, направленный на достижение рационального водопользования [24–27, 29]. Однако анализ руководств, описывающих правила и последовательность реализации ИУВР на практике [11, 16, 21], показывает, что вначале необходимо подготовить основу для перехода, для чего необходимо усовершенствовать механизмы и действующую структуру управления водохозяйственным комплексом в РК.

Для повышения эколого-экономической эффективности организации и ведения водопользования целесообразно в региональных нормативно-правовых актах отразить следующее:

разработку новой ценовой политики, основанной на внедрении дифференцированного подхода, не только исходя из категории воды (технической, питьевой) и вида водопользования (коммунально-бытового, промышленного, орошения), но и объемов потребленного ресурса;

формирование баз данных о количестве малодебитных скважин и колодцев, используемых для целей орошения приусадебных и дачных участков, о местах их расположения, глубине и объемах отбора воды;

включение в перечень видов водопользования, на которые необходимо получать разрешительную документацию, полив приусадебных и дачных участков; для этого можно использовать упрощенную схему, содержащую сведения о месте расположения точки водозабора, участке полива, предполагаемом объеме водоотбора, отчетности об использовании водных ресурсов; в условиях вододефицита это необходимо не только для уточнения сведений о фактическом использовании водных ресурсов, но и для защиты прав данной группы водопотребителей;

согласование правил землепользования и застройки территорий административных образований таким образом, чтобы максимально были защищены не только водоохранные зоны, но и области формирования водных ресурсов;

разработку правил организации и ведения орошения ограничено пригодными водами, начиная с разработки и согласования проектов и заканчивая мониторингом состояния почв, требованиями к качеству полученной сельскохозяйственной продукции;

установление и согласование цены сточной и солоноватой воды, используемой для нужд сельского хозяйства и промышленности;

предоставление сельскохозяйственным товаропроизводителям в случае использования очищенных канализационных вод льгот и субсидий, так как реализация данного процесса требует дополнительных затрат.

Усовершенствование структуры управления водохозяйственным комплексом предполагает создание площадки для совместной разработки решений по достижению сбалансированного с эколого-экономической точки зрения водопользования. Это целесообразно осуществить на базе уже созданного в РК бассейнового совета Крымского бассейнового округа. Однако для этого необходимо расширить перечень функций данного коллегиального органа, включая создание на его базе единого информационного аналитического центра, в котором будет накапливаться и комплексно анализироваться информация о нали-



Рис. 3. Структура управления водохозяйственным комплексом в Республике Крым с элементами ИУВР.

чии, использовании, техническом и экологическом состоянии водных объектов. Кроме этого, необходимо вовлечение в процесс разработки управленческих решений в водохозяйственной сфере больше заинтересованных сторон, в первую очередь – водопользователей; целесообразно предусмотреть создание дополнительных бассейновых советов, подконтрольных уже действующему. Реализация данного подхода позволит более детально учесть особенности различных групп крымских водотоков и повысить эффективность принимаемых решений.

Рекомендуемая для РК структура управления водохозяйственным комплексом приведена на рис. 3.

Следует отметить, что перечисленные выше действия – первый шаг к улучшению водохозяйственной обстановки в РК. Достижение рационального водопользования – длительный процесс. К примеру, в Израиле он растянулся на два десятилетия, к тому же не все поставленные задачи решены полностью и оптимизация водохозяйственной деятельности в этой стране продолжается и в настоящее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интегрированное управление водными ресурсами – признанный на мировом уровне методологический подход, реализация которого позволяет достичь рационального водопользования

или приблизиться к нему. Его внедрение на территории РК будет способствовать решению ряда водохозяйственных проблем: ухудшение качества водных ресурсов, дисбаланс интересов водопользователей, снижение уровня безопасности гидротехнических сооружений и т. п. Однако реализация ИУВР потребует проведения ряда преобразований в структуре управления водными ресурсами региона, в нормативно-правовой и научно-методологической базе; введения жесткого контроля за водоотбором и вовлечением в процесс водопользования всех располагаемых источников воды, включая ограниченно пригодные; подготовки высококвалифицированных специалистов для работы с современным программным обеспечением и компьютерными технологиями (ГИС-инструментарий, гидрологические модели) и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авнер А. Израиль – мировой водный лидер // НИЦ МКВК. 2008. № 1 (28). С. 51–55.
2. Болгов М.В., Веницианов Е.В., Шашков С.Н. О проблемах развития нормативно-методической базы управления водными ресурсами и водопользованием в Российской Федерации // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 2. С. 8–21.
3. Веницианов Е.В. Актуальные вопросы совершенствования системы управления охраной водных ресурсов // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 86–102.

4. *Веницианов Е.В., Аджиенко Г.В., Возняк А.А., Чиганова М.А.* Современные проблемы оценки, регулирования и мониторинга качества поверхностных вод // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 47–59.
5. *Винокуров Ю.И., Жерелина И.В., Красноярова Б.А.* Принципы управления устойчивым водопользованием в бассейне реки Оби // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия. Материалы междунард. науч. конф. Томск, 2000. С. 608–614.
6. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.06 № 74-ФЗ [Электронный ресурс]. http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683
7. Государственный доклад “О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году”. М.: НИИ-Природа, 2019. 290 с.
8. *Данилов-Данильян В.И.* Водные ресурсы России: состояние, использование, охрана, проблемы управления // Экономика. Налоги. Право. 2019. № 5. С. 18–31.
9. *Данилов-Данильян В.И., Венецианов Е.В., Аджиенко Г.В., Козлова М.А.* Оценка современных подходов к управлению качеством поверхностных вод и их охране // Вестн. РАН. 2019. Т. 89. № 12. С. 1248–1259.
10. *Данилов-Данильян В.И., Пряжинская В.Г.* Сценарии устойчивого регионального водопользования в условиях изменения климата // Проблемы прогнозирования. 2007. № 2 (101). С. 62–76.
11. *Джонч-Клаусен Т.* Интегрированное управление водными ресурсами (ИУВР) и планы повышения эффективности водопользования до 2005 г. почему, что и как? [Электронный ресурс]. <https://docplayer.ru/45296351-Integririrovannoe-upravlenie-vodnymi-resursami-iuvr-i-planu-povysheniya-effektivnosti-vodopolzovaniya-do-2005-g-pochemu-chto-i-kak.html>
12. Закон Республики Крым “О регулировании водных отношений в Республике Крым” от 08.08.2014 [Электронный ресурс]. https://md-crimea.ru/upload/FRGU_DOCS/0fb/Zakon-Respubliki-Krym-ot-21.08.2014.pdf
13. *Лев Я.* Рекомендации и мероприятия по эффективному использованию и снижению водопотребления в сельскохозяйственном секторе // Управление использованием водных ресурсов и эффективные технологии орошения. Избранные лекции курса. Учебный центр в кибуце Шфаим. 2005. С. 19–23.
14. *Озиранский Ю., Кольмакова Е.Г., Марголина И.Л.* Интегрированное управление водными ресурсами в целях устойчивого водообеспечения аридных регионов (опыт государства Израиль) // Арид. экосистемы. 2014. № 4 (61). С. 57–65.
15. *Орловский Н.С., Зонн И.С.* Водные ресурсы Израиля: опыт освоения // Проблемы постсоветского пространства. 2018. № 1. С. 8–36.
16. Планы интегрированного управления водными ресурсами: учебное пособие и руководство по применению [Электронный ресурс]. www.cawater-info.net/library/rus/gwp/iwrm_plans.pdf
17. Постановление Совета министров Республики Крым от 26.12.2017 года № 714 “Об утверждении единой схемы водоснабжения и водоотведения Республики Крым”. [Электронный ресурс]. <https://rk.gov.ru/ru/document/show/2969>
18. Приказ Федерального агентства водных ресурсов (Росводресурсы) от 15.09.2017 № 195 “О создании бассейнового совета Крымского бассейнового округа”. [Электронный ресурс]. <https://gkvod.rk.gov.ru/ru/document/show/101>
19. *Пряжинская В.Г.* Проблемы управления водными ресурсами в России // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов // Тр. VI Международ. науч.-практ. конф. Пермь, 2017. С. 222–227.
20. *Пряжинская В.Г., Левит-Гуревич Л.К., Хранович И.А., Ярошевский Д.М.* Проблемы при составлении схем комплексного использования и охраны водных объектов // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2010. № 6. С. 4–16.
21. Руководство по интегрированному управлению водными ресурсами в бассейнах [Электронный ресурс]. http://www.cawater-info.net/library/rus/gwp/handbook_iwrm_rus.pdf
22. *Рысбеков Ю.Х., Рысбеков А.Ю.* О зарубежном опыте оплаты водохозяйственных услуг // Платное водопользование: перспективы внедрения в Центральной Азии. Ташкент, 2020. С. 35–106.
23. Схема комплексного использования и охраны водных объектов Республики Крым, включая нормативы допустимого воздействия на водные объекты, и целевые показатели качества воды в водных объектах, расположенных на территории Республики Крым [Электронный ресурс]. <https://gkvod.rk.gov.ru/structure/698>
24. *Тарасенко В.С., Волкова Н.Е., Иванютин Н.М.* Интегрированное управление водными ресурсами – путь к улучшению водохозяйственной обстановки в Республике Крым // Экология и пром-ть России. 2020. Т. 24. № 9. С. 64–71. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-9-64-71>
25. *Bertule M., Glennie P., Bjørnsen P.K., Newton J., Harlin J.* Monitoring water resources governance progress globally: Experiences from monitoring SDG indicator 6.5.1 on integrated water resources management implementation // Water (Switzerland). 2018. V. 10. Iss. 12. № 1744.
26. *Duncan A.E., Vries N.De., Nyarko K.B.* The effectiveness of water resources management in Pra Basin // Water Policy. 2019. V. 21. Iss. 4. P. 787–805.
27. *Godínez-Madrugal J., Cauwenbergh N.Van., P. van der Zaag.* Production of competing water knowledge in the face of water crises: Revisiting the IWRM success story of the Lerma-Chapala Basin, Mexico // Geoforum. 2019. V. 103. P. 3–15.
28. Using Treated Wastewater in Agriculture [Электронный ресурс]. https://www.health.gov.il/English/Topics/EnviroHealth/Reclaimed_Water/kolchim/Pages/agriculture.aspx
29. *Vinod Kumar T.M., Mohammed Firoz C., Bimal P., Harikumar P.S., Sankaran P.* Smart water management for smart Kozhikode metropolitan area // Advances in 21st Century Human Settlements. Singapore: Springer, 2019. P. 241–306.
30. Water Management in Israel. Key Innovations and Lessons Learned for Water-Scarce Countries [Электронный ресурс]. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/28097/119309-WP-PUBLIC-56p-WcmpeProof.pdf?sequence=1>

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 02/504:631.432+631/635+631.6.02+556.18

**ВОДНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТЕПНОГО КРЫМА
И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ¹**© 2022 г. Е. М. Гусев^а, *, Л. Я. Джоган^а, О. Н. Насонова^а^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: sowaso@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Проведен анализ состояния водной безопасности Степного Крыма. Показано, что водная безопасность в основном определяется влагообеспеченностью посевов сельскохозяйственных культур, прежде всего зерновых, выращиваемых в данном регионе. Показано, что основная составляющая водных ресурсов в Степном Крыму – ресурсы почвенных вод. Проведен анализ возможных стратегий повышения влагообеспеченности агроценозов и эффективности использования ресурсов почвенных вод Степного Крыма. Показано, что основная стратегия повышения влагообеспеченности агроэкосистем в регионе – стратегия развития “зеленого земледелия”, основанного на рациональном использовании природных ресурсов за счет ориентации при разработке технологий природопользования на природоподобные (“nature-based”) процессы, в частности – на использование “no-till”-технологии минимальной обработки почвы с мульчированием ее поверхности растительными остатками.

Ключевые слова: ресурсы почвенных вод, влагообеспеченность, озимая пшеница, “зеленое земледелие”, “no-till”-технология, мульчирование.

DOI: 10.31857/S0321059622040071

ВВЕДЕНИЕ

Крым в целом и Степной Крым в частности – наиболее вододефицитные регионы Российской Федерации. При этом состояние необходимых для производства сельскохозяйственной продукции энергетических (поступающей солнечной радиации) и почвенных ресурсов Степного Крыма довольно хорошее. Степной Крым был и остается важнейшим производителем сельскохозяйственной продукции, особенно зерновой. Поэтому проблемы водной безопасности Степного Крыма в первую очередь определяются проблемами водообеспеченности его сельскохозяй-

ственных экосистем. Поддержанию урожайности агроценозов данного региона на достаточном уровне мешает сильная степень аридности его территории, обусловленная ограниченностью водных ресурсов. Вызванный природными условиями дефицит водных ресурсов Степного Крыма усугубляется крайней неэффективностью их использования: неоптимальным режимом использования имеющихся в регионе естественных водных ресурсов (приходящих осадков); безвозвратными потерями воды в сельском хозяйстве, нередко приводящими к деградации почв; отсутствием надежных оценок водопотребления агроценозами; а главное, практически отсутствием понимания неизбежности осуществляемого в мире закономерного и физически обоснованного перехода от стратегии применения традиционных агротехнологий, направленных на получение сиюминутной прибыли, к стратегии, ориентированной на технологии рационального использования природных ресурсов (включая водные). В связи с этим цель данного исследования – оценка масштабов проблем, связанных с водообеспеченностью агроценозов Степного Крыма, и анализ возможных путей их решения.

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН ((тема № 0126-2021-0001, государственная регистрация № 121040700170-9) “Разработка методической базы и цифровых технологий поддержки принятия решений по обеспечению водной безопасности Крыма” (раздел статьи “Возможные пути повышения влагообеспеченности агроэкосистем Степного Крыма в целях увеличения степени водной безопасности региона”), тема № FMWZ-2022-0001 “Исследования процессов гидрологического цикла суши и формирования водных ресурсов, геофизических процессов в водных объектах и их бассейнах, формирования экстремальных гидрологических явлений и динамики гидрологических систем с учетом изменяющихся климатических условий и антропогенных факторов” (все разделы статьи, кроме вышеуказанного)).



Рис. 1. Районирование Крыма. Равнинная, или степная, зона (I), горная зона (II), югобережная зона (III), Керченская грядово-холмистая зона (IV) [38].

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ, КЛИМАТИЧЕСКИЕ, ПОЧВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТЕПНОГО КРЫМА

С точки зрения геоморфологии и ландшафтного районирования, территория Крымского п-ова делится на несколько зон. На рис. 1 показано, что ~70% территории Крыма занимает именно равнинный (или степной) Крым, расположенный в северной части полуострова. Степной Крым представляет собой плоскую равнину, увязанную с эпигерцинской Скифской платформой, а с поверхности сложенную морскими неогеновыми и континентальными четвертичными отложениями.

Климат Степного Крыма умеренно континентальный с продолжительным и жарким летом и короткой мягкой зимой [20]. Такие климатические условия обусловлены тем, что для проникающих на территорию Степного Крыма воздушных масс практически нет никаких препятствий. В результате на большей части Степного Крыма климат умеренно жаркий засушливый, а в северных районах очень сухой.

Важный положительный фактор Степного Крыма — наличие значительных энергетических ресурсов, обусловленных поступающей солнечной радиацией и создающих необходимое условие для потенциально высокой первичной фотосинтетической продуктивности растительного покрова. В настоящее время среднемноголетнее (усредненное за период 1971–2005 гг.) значение приходящего коротковолнового (солнечного) излучения R_h для Степного Крыма ~137 Вт/м² [23]. Для сравнения, в московском регионе (~56° с.ш.) R_h ~ 96 Вт/м², в районе Воронежской области (~52° с.ш.) R_h ~ 110 Вт/м². А в Краснодарском крае (~45° с.ш.), находящемся примерно на одной ши-

роте с географическим центром Крымского п-ова (также ~45° с.ш.), R_h ~ 132 Вт/м², т. е. значение R_h в районе Степного Крыма близко к значению R_h на Кубани.

Хуже обстоит дело со второй составляющей природных ресурсов, обеспечивающих продуктивность естественных экосистем и агроценозов в степной части Крыма, — водными ресурсами. Степной Крым отличается значительной недостаточностью и неустойчивостью ресурсов естественного увлажнения. Годовые суммы осадков в целом по степному региону 300–400 мм.

В итоге в Степном Крыму коэффициент увлажнения по Н.Н. Иванову (отношение выпадающих за год осадков к годовому потенциальному испарению) [17] $KУ < 0.6$ [1]. Такое значение $KУ$ свойственно территориям умеренно-недостаточного (неустойчивого) увлажнения — сухим степям, сухим саваннам.

Неустойчивость естественного увлажнения Степного Крыма часто приводит к таким отрицательным с точки зрения человека климатическим явлениям, как засухи и суховеи, что сказывается в определенной мере на режиме вегетации естественной растительности и причиняет существенный ущерб агроценозам.

Что касается почвенного покрова, то в Степном Крыму преобладают черноземы южные, а также каштановые почвы, сформировавшиеся на лессовидных породах возвышенной волнистой равнины [14, 25, 26]. Несмотря на происходящие в указанном регионе (впрочем, как и в большинстве других регионов мира) процессы деградации почвенного покрова [13, 15], почвы Степного Крыма по их водно-физическим свойствам и уровню плодородия довольно благоприятны для выращивания сельскохозяйственных культур [16].

Содержание гумуса в пахотном слое в среднем ~3%, а на целинных землях доходит до 4%.

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО СТЕПНОГО КРЫМА

На основе сказанного выше можно сделать вывод о том, что состояние необходимых для производства сельскохозяйственной продукции энергетических (поступающей солнечной радиации) и почвенных ресурсов Степного Крыма довольно хорошее. Проблема заключается только в ограниченности водных ресурсов. Несмотря на это обстоятельство, Крым был и продолжает оставаться производителем сельскохозяйственной продукции.

Сельское хозяйство Крыма – одна из важнейших отраслей его экономики. На нее приходится ~17% валового регионального продукта региона [35]. Сельхозугодья занимают ~69% территории Крыма (большая их часть находится в Степном Крыму, где сельское хозяйство – главная отрасль). В их структуре: пашня ~71, многолетние насаждения ~4, сенокосы и пастбища ~25% [19].

Первое место в структуре посевных площадей занимает пшеница (~40% всех посевных площадей региона), затем ячмень (~28), подсолнечник (~12), зернобобовые культуры (3%) [34]. Таким образом, основа сельского хозяйства Крыма – это прежде всего зерновые. Его степная часть, благодаря климату и качеству почв, особенно благоприятна для выращивания озимой пшеницы.

При этом надо отметить следующее обстоятельство. Являясь одним из основных экспортеров пшеницы в мире, Россия, тем не менее, импортирует пшеницу из Казахстана, производящего пшеницу твердых сортов, произрастанию которых способствуют климатические условия страны. Мука твердой пшеницы ценится в производстве макаронных изделий, а также при выработке манной крупы и муки-крупчатки. Но твердым сортам нужен сухой воздух. Лучшее всего такая пшеница растет в местности с хорошо выраженным континентальным климатом [28]. В Российской Федерации районов, в которых климатические условия способствуют производству твердой пшеницы, не так много. Один из таких районов – Степной Крым.

Таким образом, Степной Крым – важный сельскохозяйственный регион Российской Федерации. Главная же его проблема – слабая обеспеченность водными ресурсами, влекущая за собой проблему его водной безопасности. Рассмотрим проблему водных ресурсов Крыма в целом, подойдя к такому анализу не с общепринятых антропоцентрических водохозяйственных позиций [2, 36, 45], а на основе экологической биосферной концепции, которая дает более широкий взгляд

на указанную проблему и обеспечивает нестандартные пути ее решения, направленные на перспективу устойчивого развития человеческой популяции с учетом рационального использования биосферных ресурсов.

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ СУШИ В ЦЕЛОМ, РЕСУРСЫ ПОЧВЕННЫХ ВОД И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ

Указанная концепция заключается в следующем. В [5, 6, 53] показано, что в процессе эволюции жизни на Земле произошло сопряжение двух глобальных циркуляционных диссипативных структур, двух гигантских “шестеренок”: физической циркуляции воды в системе почва – растительный покров – атмосфера (СПРА) и циркуляции биоэлементов в экосистемах наземных растений. Без этого сопряжения невозможно приведение в действие онсагеровских круговоротов биоэлементов в системе зеленых растений суши. Поскольку зеленые растения представляют собой начальное звено трофической цепи наземных экосистем, циркуляция воды в СПРА, уносящая производимую растительным покровом в процессе его вегетации энтропию, по существу “раскручивает” круговорот биоэлементов во всей системе биоценозов суши, т. е. жизнь на планете.

Отсюда следует, что диссипативная структура циркуляции воды в СПРА – необходимый экологический ресурс (названный ресурсом почвенных вод), используемый биоценозами суши. Впервые введенной А.И. Будаговским [3] мерой ресурсов почвенных вод, т. е. показателем, характеризующим потенциальную мощность используемой биосферой циркуляции воды в СПРА, может служить величина суммарного испарения с рассматриваемой территории суши за характерный промежуток времени, например за год.

Рассмотренный подход дает возможность ввести такой показатель, как коэффициент полезного использования (коэффициент эффективности) ресурсов почвенных вод растительным покровом η_e [3]. Полезная – продуктивная – часть суммарного испарения – ее составляющая, связанная с потоком воды через устьица растений – транспирация. Поэтому в качестве η_e может выступать отношение транспирации E_T к суммарному испарению E :

$$\eta_e = E_T / E. \quad (2)$$

Кроме того, можно ввести еще один полезный показатель, отражающий степень влагообеспеченности растительного покрова – η_w [3], определяемый как

$$\eta_w = E_T / EP_T, \quad (3)$$

где EP_T – так называемая потенциальная транспирация, т. е. транспирация растительного покрова в условиях достаточного увлажнения, когда значение E_T не лимитируется влажностью почвы, регулирующей степень открытости устьиц листьев, и имеет максимальное при конкретных метеорологических условиях значение (устьица листьев в этом случае максимально открыты).

Структура циркуляции воды в СПРА – составная часть более общей диссипативной системы гидрологического цикла суши. В этой системе можно выделить еще две крупномасштабные структуры: циркуляция воды в системе: атмосфера – поверхность суши – водоток – водоем – атмосфера; циркуляция воды в системе: атмосфера – поверхность суши – грунтовые воды – водоем – атмосфера. Интенсивности циркуляции воды в каждой из указанных структур определяют и меры водных ресурсов этих структур – величины стока соответственно поверхностных и подземных вод. Все три структуры связаны между собой. Руслонная сеть может дренировать грунтовые воды, а может способствовать дополнительному питанию подземных водных горизонтов. Грунтовые воды могут подпитывать корнеобитаемый слой почвы. Соответственно, это влечет за собой и взаимный обмен ресурсов поверхностных, подземных и почвенных вод.

Ресурсы всех составляющих вод суши связаны при данном подходе одной методологической основой – они определяются на основе интенсивности потоков воды в соответствующей диссипативной структуре, поскольку интенсивность непрерывных жизненных процессов на Земле поддерживается только такими ресурсами, которые также имеют непрерывный и возобновляемый характер. В этом смысле всякого рода мгновенные “запасы” ресурсами не являются. Они служат характеристиками состояния элементов, образующих соответствующую диссипативную структуру, позволяя оценивать возможности регулирования временной динамики ее ресурса. Конечно, в более узком смысле “запасы” каких-либо субстанций можно трактовать в качестве “ресурса” для кратковременного, разового его использования, но отнюдь не как ресурса, обеспечивающего непрерывность жизни на Земле.

Циркуляция воды в указанных структурах в конечном итоге поддерживает непрерывную циркуляцию биоэлементов суши. Поэтому их и можно рассматривать в качестве биосферных ресурсов. В большей степени это относится к почвенным водам, поскольку они приводят в движение самое мощное звено в циркуляции биоэлементов наземных экосистем – звено зеленых растений суши. Поверхностные и подземные воды (воды рек, озер, болот, водохранилищ, артезианские воды и т. д.) в этом смысле имеют меньший коэф-

фициент полезного действия. Однако в силу большой концентрации водных масс эти воды удобны для использования более сложными, с большей пространственной локализацией и более мощным метаболизмом биологическими структурами, такими, например, как животные и человек. Тем не менее подчеркнем, что в настоящее время ~65% так называемых “безвозвратных потерь” стока, т. е. изымаемых человеком ресурсов поверхностных и подземных вод, используются в сельском хозяйстве, прежде всего в орошаемом земледелии [18].

Это означает, что человеческой популяции на определенном этапе ее существования оказалось более удобным поддерживать свой гомеостазис, потребляя ресурсы поверхностных и отчасти подземных вод с переводом их в ресурсы почвенных вод. Однако удобство или в каком-то смысле “выгодность” определенного пути использования ресурсов с точки зрения части системы (человеческая популяция представляет собой часть биосферы в целом) вовсе не означает “выгодность” этого пути с позиций всей системы. В данном случае искусственное изменение эволюционно сложившихся структур общей циркуляции вод суши скорее всего невыгодно биосфере в целом с точки зрения минимизации общего производства энтропии в ней [22], поскольку увеличение и постоянное поддержание упорядоченности создаваемых новых структур (в частности, структур мелиоративных систем), влекущее за собой локальное уменьшение энтропии в месте расположения этих структур, “обусловлено тем, что где-то в другом месте порождается еще большая неупорядоченность” [46]. Последнее обстоятельство – простое следствие второго начала термодинамики.

На основе изложенной концепции водных ресурсов перейдем к рассмотрению водных ресурсов Крыма.

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ КРЫМА

В Крыму очень напряженный водный баланс. Ресурсы естественного увлажнения, т. е. приходная статья водного баланса, – среднесуточные за период 1881–2018 гг. осадки – составляют ~520 мм/год (или с учетом площади полуострова ~14 км³/год) [21]. Среднесуточный речной сток Крыма составляет ~1 км³/год [29]. Эта величина примерно поровну разделена между поверхностным стоком и дренирующимися подземными водами [29]. Таким образом, сумма ресурсов поверхностных и подземных вод Крыма составляет ~7% ресурсов естественного увлажнения (осадков). Такой низкой относительной величины ресурсов поверхностных и подземных вод нет ни в одном другом регионе страны. Зато ресурсы почвенных вод составляют 93% ресурсов

Таблица 1. Сравнительная балансовая оценка составляющих водных ресурсов всей суши, Российской Федерации и Республики Крым, мм/год (% от осадков)

Составляющие водных ресурсов (составляющие водного баланса)	Вся суша	Российская Федерация	Республика Крым
Ресурсы естественного увлажнения (осадки)	834 (100)	548 (100)	516 (100)
Ресурсы поверхностных вод (поверхностный сток)	204 (24)	190 (35)	19 (4)
Ресурсы подземных вод (подземный сток)	90 (11)	47 (8)	18 (3)
Сумма ресурсов поверхностных и подземных вод (речной сток)	294 (35)	237 (43)	37 (7)
Ресурсы почвенных вод (суммарное испарение)	540 (65)	311 (57)	479 (93)

естественного увлажнения. Для сравнения приведены различные составляющие водных ресурсов суши в целом, Российской Федерации и Республики Крым (табл. 1) по данным из [21, 29].

Как видно из табл. 1, в силу климатических условий относительные величины ресурсов поверхностных и подземных вод в Российской Федерации, как и следовало ожидать, больше, чем для суши в целом, а ресурсы почвенных вод гораздо меньше. В то же время для Крыма ситуация значительно отличается от ситуаций как для суши в целом, так и для России. Как отмечено выше, крайне скудны ресурсы поверхностных и подземных вод и значительна относительная величина ресурсов почвенных вод (что, правда, не означает хорошую водообеспеченность растительного покрова, поскольку она определяется соотношением водных и тепловых ресурсов территории, а в Крыму это соотношение далеко от оптимального).

Поскольку в Крыму ресурсы поверхностных и подземных вод крайне малы, решение проблемы водной безопасности, по крайней мере в области сельского хозяйства Крыма, связанной и с его продовольственной безопасностью, следует искать на пути рационального использования и оптимального управления ресурсами именно почвенных вод. В Степном Крыму ситуация с водными ресурсами не лучше, чем по Крыму в целом, поскольку, как указано выше, среднесуточные суммы осадков в Степном Крыму равны 300–400 мм/год, что с учетом его площади составляет 5.7–7.7 км³/год.

Таким образом, наиболее распространенный в сельском хозяйстве путь решения проблемы повышения водообеспеченности агроценозов, основанный на переводе части ресурсов поверхностных и подземных вод (речного стока) в ресурсы почвенных вод на основе применения орошения, в Степном Крыму невозможен. В этом регионе этих ресурсов просто нет. Подчеркнем еще раз, что имеющиеся в Крыму, как и во многих других регионах страны, не вовлеченные в го-

довой климатический круговорот запасы артезианских вод, согласно рассмотренной выше концепции ресурсов почвенных вод, ресурсами не являются.

Следует отметить, что какое-то время такой путь все же существовал и был связан с переброской ресурсов поверхностных и подземных вод (днепровской воды) из другого региона (Украины) с последующим их переводом посредством ирригации агроценозов Степного Крыма в ресурсы почвенных вод. Указанная переброска водных ресурсов соседнего региона осуществлялась на основе Северо-Крымского канала (СКК) (рис. 2). СКК – оросительно-обводнительный канал, построенный в 1961–1971 гг. общими усилиями СССР для обеспечения водой маловодных и засушливых территорий Херсонской и Крымской областей Украинской ССР с забором воды из специально построенного в нижнем течении Днепра Каховского водохранилища, заполненного в 1955–1958 гг. [33].

Ежегодно в Крым по СКК поступало в среднем 1.5–1.7 км³/год днепровской воды (напомним для сравнения, что ресурсы естественного увлажнения Степного Крыма составляют 5.7–7.7 км³/год). При этом 70–80% переброски с помощью СКК водных ресурсов использовалось для нужд сельского хозяйства (орошения). С 2014 г. поступление днепровской воды в СКК перекрыто, приток воды на территорию Крымского п-ова практически прекратился. В результате орошаемые сельскохозяйственные площади Степного Крыма, а именно ирригация составляла основной способ обеспечения его водной безопасности, сократились на 94–95%. Таким образом, вариант обеспечения водной безопасности Степного Крыма (связанный с необходимой степенью водообеспеченности его агроценозов), в основу которого положен вариант переброски водных ресурсов соседнего региона, в настоящее время отсутствует. В 2022 г. появилась вероятность возобновления работы СКК. Тем не менее



Рис. 2. Картограмма СКК и орошаемых земель до 2014 г. [42].

даже этот факт не снимает с повестки дня проблему повышения водообеспеченности агроценозов Степного Крыма, что обуславливает необходимость поиска других путей решения указанной проблемы, альтернативных использованию ирригации.

Прежде чем рассматривать эти пути, необходимо количественно оценить показатели водообеспеченности агроценозов Степного Крыма, чтобы понять специфику требующей решения проблемы. Такая оценка проведена в данной работе на примере основной, как отмечено выше, зерновой культуры Степного Крыма – озимой пшеницы.

ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ОСНОВНОЙ ЗЕРНОВОЙ КУЛЬТУРЫ СТЕПНОГО КРЫМА – ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Объект исследования – посевы озимой пшеницы на четырех агрометеорологических станциях (Ишунь, Черноморское, Клепинино, Нижнегорск) в степной части Крымского п-ова (рис. 3). Физико-географические условия и характеристики почв в районах расположения станций описаны в [10]. Водообеспеченность и другие характеристики агроценозов оценивались для посевов, для возделывания которых применялась традиционная агротехнология, включающая в себя вспашку почвы с оборотом пласта, многократные проходы сельскохозяйственной техники по полю, применение минеральных (химических) удобрений

и ядохимикатов для защиты растений, уход за посевами [40].

В качестве основного инструмента оценки показателей водообеспеченности и урожайности посевов пшеницы использовалась разработанная авторами статьи физико-математическая модель формирования водного режима агроценозов MULCH [5, 10]. В [10] приведены результаты проверки работоспособности модели MULCH для условий Степного Крыма. Важные особенности модели – возможность отдельной оценки продуктивного испарения (транспирации) и его непродуктивной составляющей (остальной части суммарного испарения), а также возможность расчета динамики роста агроценоза в зависимости от его водно-теплового режима. В качестве входной информации использовались суточные значения метеорологических характеристик и характеристики почвенного покрова в районах расположения четырех указанных агрометеорологических станций за период 1970–1979 гг. Динамика относительной площади листьев пшеницы LAI и урожайность посевов Y рассчитывались с помощью модельного блока формирования LAI в модели MULCH, описанного в [5, 7, 8]. При этом единственным калибруемым параметром модели был корректирующий множитель для урожайности, оптимизируемый на основе известных данных по измеренным значениям Y . Для определения этого множителя использовались значения урожайности озимой пшеницы, приведенные в



Рис. 3. Расположение четырех агрометеорологических станций степного Крыма (серые кружки), данные наблюдений которых использованы в работе [10]. Черными кружками показаны столицы субъектов РФ в Крыму.

[43]. Полученные результаты частично представлены в [10].

В настоящей работе с целью получения обобщенных значений характеристик влагообеспеченности (коэффициента влагообеспеченности, коэффициента эффективности использования ресурсов почвенных вод, дефицита испарения, оросительной нормы и т.д.) и урожайности пшеницы по Степному Крыму в целом их рассчитанные значения для отдельных станций были усреднены по всему расчетному периоду и по всем станциям. Расчеты выполнены на примере озимой пшеницы для двух вариантов ее водного режима – богарного и в условиях орошения. По всей видимости, результаты расчетов без существенной погрешности будут справедливы и для посевов других зерновых культур, включенных в соответствующие севообороты на пахотных площадях Степного Крыма.

Представляет интерес сравнение объема затрачиваемой на орошение до 2014 г. воды, рассчитанного с использованием полученного на основе MULCH среднесуточного значения оросительной нормы для озимой пшеницы (~190 мм), с общим объемом орошения, полученным на основе анализа водного баланса суммарных водных ресурсов, приходящих до 2014 г. в Крым с днепровской водой по СКК (рис. 2). Данные по различным составляющим водного баланса в разных литературных источниках несколько различаются, но в первом приближении такой анализ провести возможно.

Так, в 2013 г. – последнем году функционирования СКК – в Крым было поставлено ~1.6 км³ воды (включая и небольшую долю местных ис-

точников) [33, 41]. Из них общие транспортные потери в системе каналов на испарение и фильтрацию в подземные водоносные горизонты за год составили ~0.7 км³. Из оставшейся днепровской воды на орошение было подано ~0.68 км³ [12]. Большая часть ее пошла на обеспечение выращивания риса (~0.47 км³). В результате оставшаяся часть воды, израсходованная в 2013 г. на орошение других сельскохозяйственных культур, составила ~0.21 км³.

Если принять вышеприведенную рассчитанную на основе MULCH среднесуточную оросительную норму посевов пшеницы в Степном Крыму ~190 мм за оросительную норму посевов всех культур, то с учетом площади орошаемых сельскохозяйственных угодий, составляющей в 2013 г. ~125 тыс. га (за вычетом площадей, занятых под посевы риса), общий объем воды, израсходованной в 2013 г. на орошение других зерновых и кормовых культур (исключая рис), окажется равным ~0.23 км³.

Таким образом, видно, что проведенные на основе модели MULCH оценки оросительных норм озимой пшеницы в Степном Крыму (значения которых без значительной потери точности можно распространить и на другие зерновые культуры, исключая рис) можно признать достоверными. Данное обстоятельство, а также проведенные ранее многочисленные проверки качества модели MULCH и ее отдельных блоков [5, 10] подтверждают работоспособность модели MULCH при оценке влагообеспеченности зерновых в Степном Крыму.

Таблица 2. Среднегодовое значение показателя водообеспеченности η_w , коэффициента полезного использования ресурсов почвенных вод η_e и урожайности посевов озимой пшеницы Y в Степном Крыму при различных вариантах водного режима агроценоза и используемой агротехнологии

Вариант водного режима агроценоза и используемой агротехнологии	η_w	η_e	Y , ц/га
Традиционная агротехнология на богаре	0.63	0.48	28
Традиционная агротехнология с орошением	1.0	0.54	41
Технология “no-till” с мульчированием почвы на богаре	0.72	0.70	33

Рассмотрим полученные результаты. В первых двух строках табл. 2 приведены рассчитанные среднегодовое значение показателя водообеспеченности и урожайности посевов богарной и орошаемой озимой пшеницы в Степном Крыму за безморозный период года при традиционной агротехнологии ее возделывания. Они показывают, что при использовании орошения, естественно, увеличивается показатель водообеспеченности посевов η_w с 0.63 до 1.0 за счет того, что значительно возрастают ресурсы почвенных вод. До 2014 г. это увеличение было обусловлено переводом ресурсов поверхностных и подземных вод соседнего региона (за счет прихода днепровской воды) в ресурсы почвенных вод Степного Крыма. Заметим, что при этом относительно мало меняется коэффициент полезного использования (эффективности) ресурсов почвенных вод η_e (он повышается в среднем с 0.48 до 0.54), т. е. значительная доля (порядка половины) ресурсов почвенных вод в Степном Крыму при применяемой традиционной технологии земледелия продолжает использоваться непродуктивно (испаряется оголенной почвой) и в случае орошения.

В настоящее время практически все сельскохозяйственные поля, расположенные в Степном Крыму, являются богарными (вообще говоря, и при наличии СКК большая часть (>80%) посевных площадей Крыма также ежегодно не орошались). Но в этих условиях, как показывают полученные результаты, наблюдается очень низкая эффективность использования ресурсов почвенных вод (основной составляющей водных ресурсов Степного Крыма) при применяемых технологиях земледелия (практически половина вертикальной расходной составляющей гидрологического цикла – суммарного испарения – расходуется непродуктивно). В то же время видно, что имеется резерв повышения водообеспеченности посевов за счет повышения η_e .

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ СТЕПНОГО КРЫМА

Полученные результаты оценки водообеспеченности агроэкосистем Степного Крыма показывают, что в целях повышения водной безопасности этого региона необходима разработка мероприятий по увеличению водообеспеченности его сельскохозяйственных посевов [27]. Эта задача тесно связана с утвержденной в 2019 г. Долгосрочной стратегией развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 г., цель которой – формирование высокоэффективной, научно и инновационно ориентированной и инвестиционно привлекательной сбалансированной системы производства, переработки, хранения и реализации основных зерновых и зернобобовых культур. Зерновое производство – основа агропромышленного комплекса Российской Федерации и одна из крупнейших отраслей экономики. Состояние зернового производства и положение на рынке зерна принимаются в качестве основного показателя продовольственной безопасности.

Решение задачи увеличения водообеспеченности сельскохозяйственных посевов в Степном Крыму возможно на основе двух разных стратегий. Первая (экстенсивная) стратегия связана с повышением водообеспеченности агроценозов путем увеличения ресурсов почвенных вод за счет привлечения дополнительных водных ресурсов, например переброски ресурсов поверхностных и подземных вод (речного стока) из других регионов с последующим их переводом путем орошения в дополнительные ресурсы почвенных вод. Такой вариант уже применялся на основе работы СКК и закончился в 2014 г.

Что касается местных ресурсов поверхностных и подземных вод (местного речного стока), то в Степном Крыму их просто нет, а переброска таких ресурсов из других областей Крыма также не решает задачу (этих вод в лучшем случае хватит на коммунальное и питьевое водоснабжение Крыма).

Предлагаются проекты переброски воды из соседних регионов (рек Дона или Кубани) [24, 30], которые, по мнению авторов настоящей работы,

не выдерживают никакой критики ни с экономической, ни с экологической точек зрения.

Еще один из вариантов пополнения ресурсов почвенных вод — бурение скважин для добычи воды из артезианских запасов подземных вод [24]. Причем, именно “запасов”, а не “ресурсов”, поскольку эти воды не включены в активный годовой климатический круговорот воды на суше (гидрологический цикл). А согласно концепции, изложенной выше, все живые структуры на Земле — “проточные” диссипативные системы, в которых происходит возобновляемый круговорот биоэлементов [44, 57]. Ресурсами, используемыми такими системами и обеспечивающими непрерывность жизни, служат также возобновляемые потоки различных субстанций, в том числе и потоки воды. В этом смысле запасы подземных водосодержащих горизонтов ресурсами не являются. Использование запасов глубинных подземных вод (включая и совершенно неизученный, но уже обсуждаемый на правительственном уровне вариант использования запасов пресных вод под мелким Азовским морем [11]) — это временная аварийная мера, направленная на избежание негативной ситуации в ближайшее время. Но строить стратегию решения поставленной задачи на их эксплуатации невозможно — в перспективе это приведет к более катастрофическим последствиям, чем сложившаяся в настоящее время ситуация.

И, наконец, еще один вариант получения дополнительных источников пресной воды — это опреснение морской. Но этот источник не может пополнить ресурсы почвенных вод Степного Крыма. Обычно опреснение осуществляется двумя основными способами: термическим, когда при высокой температуре вода испаряется, а полученный пар затем конденсируется, или физическим (обратный осмос), когда вода под большим давлением проходит сквозь синтетические полупроницаемые мембраны и при этом очищается от молекул соли. Громадные энергоемкость и, соответственно, эксплуатационная стоимость обеих технологий (яркий пример типичных техносферных, “серых” технологий) делает их крайне антиэкологичными. В конечном итоге за все платит биосфера [49]. А в этом случае цена за повышение влагообеспеченности посевов Степного Крыма слишком высока.

Кроме того, ирригация, для проведения которой и планируется привлечение дополнительных источников воды (в том числе и СКК), наряду со значительными экономическими затратами наносит серьезный экологический ущерб окружающей среде, приводя в первую очередь к деградации почвенного покрова [13].

Вторая стратегия повышения водообеспеченности сельскохозяйственных посевов Степного Крыма не требует привлечения дополнительных водных ресурсов. Ее основа — повышение эффективности использования имеющихся ресурсов почвенных вод за счет инновационных подходов в агротехнологиях, применяющихся при производстве сельскохозяйственной продукции на полях Степного Крыма [27]; тем более что значительный резерв неиспользуемых продуктивно ресурсов почвенных вод, как было отмечено, в Степном Крыму имеется. Нетрадиционные подходы, увеличивающие (наряду с получением ряда других положительных эффектов) эффективность использования воды агроценозами (в направлении ее значений, приближающихся к значениям эффективности естественных ценозов), должны основываться на приемах инновационного направления в сельском хозяйстве — так называемого “зеленого земледелия”. Конечно, при этом также должны быть исключены посевы влаголюбивых культур, в частности таких, как рис.

В основе стратегии “зеленого земледелия” лежит рационализация использования в сельском хозяйстве доступных природных ресурсов. Фундаментом указанной рационализации служат природоподобные (“nature-based”) технологии использования человеком таких ресурсов. В земледелии это связано с переходом на нетрадиционные (природоподобные, адаптивные, почвозащитные, природоохранные, минимальные, нулевые, зеленые (“green”), “no-till”) технологии обработки почвы [31, 58, 60].

Система “no-till” обработки почвы (рис. 4) в настоящее время становится современной системой земледелия, при которой почва практически не обрабатывается (иногда используется небольшое, поверхностное рыхление), а ее поверхность покрывается измельченными остатками растений — мульчей, т. е. на почве создается “одеяло” из пожнивных растительных остатков. Процесс образования эффективного мульчирующего слоя может длиться несколько лет. После создания “одеяла” из мульчи разрушенный в результате постоянного оборота пласта почвенный биоценоз постепенно восстанавливается, что приводит к сохранению содержания углерода в почве и воспроизводству ее плодородия [48]. Идеальная ситуация для почвы: интенсивный круговорот питательных элементов, значительное содержание углерода, минимизация использования минеральных удобрений и почти полное исключение почвенной эрозии [32, 47, 55, 56] — достигается при использовании технологий “no-till” за ~20 лет. Кроме того, мульчирующий покров способствует



Рис. 4. Обработка почвы с использованием “no-till” технологии [59].

более эффективному использованию ресурсов почвенных вод за счет уменьшения непродуктивного испарения оголенной почвой [51, 52, 59].

При ориентации на стратегию “no-till” при долговременном (>10 лет) использовании мульчирующего покрытия на поверхности почвы увеличивается инфильтрационная способность почвы за счет улучшения структуры почвенных капилляров, повышения активности дождевых червей и уменьшения переуплотнения почвы ниже плужной подошвы.

Важный аспект в растениеводстве – борьба с сорняками, основной элемент которой при традиционной агротехнике – плуг. При “зеленом земледелии” (в отсутствие отвальной вспашки) применяется ряд методов, из которых наиболее эффективные – использование плоскорезных культиваторов, подрезающих корневую систему сорняков, а также применение сидератов (покровных культур), имеющих многоцелевое назначение. Сидераты предотвращают эрозию почвы, увеличивают процент содержания органических веществ в ней, полезны в борьбе с насекомыми-вредителями и болезнями. Глубокая корневая система многих сидератов и быстрый рост делает их эффективными средствами борьбы с сорняками.

Несмотря на широкое распространение в настоящее время в мире (особенно на американском и австралийском континентах) технологий “no-till”, в России подобная практика используется пока фрагментарно в Башкортостане, Зауралье, на Алтае, в Южной Сибири, тем не менее показывая вполне приличные результаты [31]. Отдельные хозяйства Крыма также начинают применять “no-till” [37].

На данный момент эффективность технологий “no-till” оценивается на экспериментальном агрономическом уровне. Дать более или менее

обоснованную оценку этой эффективности при использовании долговременной мульчи в конкретном районе можно только теоретически. Основываясь на использовании модели MULCH, авторы статьи попытались в данной работе дать такую оценку для посевов пшеницы в Степном Крыму. При этом информационное обеспечение было тем же и для тех же агрометеорологических станций, что и при рассмотренных выше расчетах влагообеспеченности посевов пшеницы при традиционной агротехнологии. Дополнительной информацией при проведении расчетов послужили параметры соломенной мульчи (ее водоудерживающая способность и коэффициент конвективной диффузии пара в ней), полученные в [5, 9]. Выходными переменными были те же характеристики водного режима посевов, что и при расчетах, выполненных ранее для традиционной агротехнологии.

Полученные характеристики водного режима посевов пшеницы и их урожайность при применении технологии “no-till” приведены в табл. 2. Видно, что по сравнению с вариантом использования традиционной технологии водообеспеченность посевов при “no-till” возрастает с 0.63 до 0.72 (увеличивается на 14%). Происходит это за счет увеличения доли транспирации в суммарном испарении – увеличивается η_e . В этом случае он заметно выше, чем при использовании традиционной агротехнологии как на богаре, так и на поливных полях. Соответственно, при долговременном мульчировании на ~5 ц/га (~18%) возрастает и среднемноголетняя урожайность пшеницы. При этом учтено влияние мульчи на гумификацию почвы, т. е. на увеличение ее плодородия, что приводит к возрастанию урожайности пшеницы на ~1.2 ц/га [10].

Согласно данным, приведенным в табл. 2, и указанной выше оросительной норме, в Степном Крыму при использовании ирригации, равной

190 мм, можно дать грубую оценку ее эффективности, которая состоит в том, что при использовании орошения для повышения урожайности пшеницы на 1 ц/га требуется ~15 мм слоя оросительной воды. Таким образом, использование “no-till” с мульчированием, повышающее урожайность пшеницы на 5 ц/га, эквивалентно использованию ~75 мм слоя ирригационной воды. Порядок величины такой оценки соответствует имеющимся агрономическим оценкам экономии почвенной воды при выращивании зерновых в странах с широким применением технологии “no-till” (в Казахстане – 50–60, в Аргентине – 100–150 мм/год [4]). В настоящее время в наибольшей мере технология “no-till” используется в Бразилии на 45% посевной площади, в Аргентине – на 60, в Парагвае – на 80, в Австралии – на 70% [39, 54]. Если подобную технологию применить хотя бы на 50% посевных площадей Крыма, составляющих ~700 тыс. га, то полученное при этом увеличение урожайности зерновых Y будет соответствовать такому же увеличению их урожайности в случае подачи на поля оросительной воды объемом 0.27 км³/год. Для сравнения напомним, что общий объем воды, дошедшей по СКК до орошаемых полей всех сельскохозяйственных культур Крыма (за исключением риса) в 2013 г., составил 0.21–0.23 км³/год.

Подводя итоги проделанного в работе анализа, можно сказать, что основной из рассмотренных стратегий повышения водной безопасности Степного Крыма должна стать стратегия повышения эффективности использования имеющихся ресурсов почвенных вод, связанная с повышением влагообеспеченности агроценозов региона на базе применения методов “зеленого земледелия”. Основа “зеленого земледелия” – развитие агротехнологий, ориентированных на применение природоподобных (“nature-based”) процессов. Дополнительные аргументы в пользу данной стратегии – также ее экономическое преимущество (затраты на получение одинакового урожая при использовании “no-till” меньше, чем при использовании традиционной агротехнологии на богаре, и гораздо меньше, чем при использовании ирригационных систем) [4, 52], а также ее большая экологичность (“no-till” способствует сохранению природных ресурсов, включая в том числе и плодородие почвы).

Следует отметить, что переход от “серых” технологических технологий к “зеленым” природоподобным технологиям – закономерное явление в эволюции технологий природопользования. Необходимость смены указанных технологий определяется просто законами физики, а более точно – законами неравновесной термодинамики, определяющими, в частности, и эволюцию человеческой популяции на Земле [4, 50, 51].

Начало реализации стратегии “зеленой экономики” именно в настоящее время обусловлено во многом достижениями в науке, получаемыми на стыке различных научных дисциплин. На предыдущем этапе развития человечества приоритетным направлением в науке был анализ природных процессов, что неизбежно вело к формированию научного мышления, связанного с разделением знаний о Природе на множество часто совсем не связанных друг с другом научных областей. Накопилась база знаний, которые существуют отдельно друг от друга, плохо отражая единство Природы (Природа не знает научных дисциплин). Но сейчас наступил этап синтетического мышления как в науке, так и в практике. Поэтому развитие природоподобных технологий (ориентированных на целостность Природы), в том числе и в области сельского хозяйства, – неизбежность будущего взаимодействия человека с окружающей средой. Очевидно, что прежде всего указанные технологии природопользования будут появляться в регионах, специфика которых связана с определенными вызовами человеческой популяции, в том числе и с вызовами водной безопасности, которые, конечно, присутствуют в Степном Крыму.

ВЫВОДЫ

Показано, что водная безопасность Степного Крыма в основном определяется влагообеспеченностью посевов сельскохозяйственных культур, выращиваемых в данном регионе, прежде всего зерновых, влагообеспеченность которых в настоящее время недостаточна.

На основе физико-экологической концепции ресурсов почвенных вод проведен анализ состояния водных ресурсов Степного Крыма. Показано, что основная составляющая водных ресурсов в Степном Крыму – ресурсы почвенных вод, определяемые величиной суммарного испарения в регионе.

Проведен анализ возможных стратегий повышения влагообеспеченности агроценозов Степного Крыма. Показано, что экстенсивный путь решения данной проблемы, связанный с использованием ирригации, основанной на использовании других водных ресурсов, в Степном Крыму мало перспективен как с экономической, так и с экологической точек зрения.

Показано, что основная стратегия повышения влагообеспеченности агроэкосистем Степного Крыма – стратегия развития в регионе “зеленого земледелия”. Она характеризуется рациональным использованием природных ресурсов за счет ориентации при разработке агротехнических технологий на природоподобные (“nature-based”) процессы, в частности – использованием практики “no-till” минимальной обработки поч-

вы; мульчированием ее поверхности растительными остатками, приводящим к уменьшению эрозии почвы и непродуктивного испарения; минимизацией уплотнения почвы; сокращением использования гербицидов за счет применения покровных культур и т. д. Показано, что аналогичное повышение урожайности зерновых на полях Степного Крыма в отсутствие такой стратегии потребовало бы привлечения в год в среднем 75 мм слоя поливной воды, что крайне нежелательно как по экономическим, так и по экологическим соображениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабков И.И.* Климатическое районирование. Климатические районы Крыма // Климат Крыма. Л.: Гидрометиздат, 1961. <http://www.bibliotekar.ru/7-krum/index.htm> (дата обращения 10.09.2021).
2. Большая российская энциклопедия. Водные ресурсы. <https://bigenc.ru/geography/text/5563684> (дата обращения 17.04.2021)
3. *Будаговский А.И.* Ресурсы почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова // Вод. ресурсы. 1985. № 4. С. 3–13.
4. *Гусев Е.М.* Перспективы использования принципов “зеленой экономики” в сельском хозяйстве // *Международ. науч.-иссл. журн.*. 2020. № 1 (91). Ч. 1. С. 87–99.
5. *Гусев Е.М.* Ресурсы почвенных вод и экология наземного растительного покрова. Концепции, эксперимент, расчеты. Saarbrücken: Palmarium Acad. Publ., 2012. 116 с.
6. *Гусев Е.М.* Экологическая роль почвенных вод и их ресурсы // Вод. ресурсы. 1990. № 5. С. 110–121.
7. *Гусев Е.М., Бусарова О.Е.* Моделирование динамики относительной площади листьев злаковых культур // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 1. С. 100–107.
8. *Гусев Е.М., Бусарова О.Е.* Энергетическая оценка эффективности агротехнологий // *Почвоведение*. 2001. № 7. С. 832–844.
9. *Гусев Е.М., Бусарова О.Е., Шурхно А.А., Ясинский С.В.* Влияние соломенной мульчи на термический режим почвы после схода снежного покрова // *Почвоведение*. 1992. № 5. С. 49–59.
10. *Гусев Е.М., Джоган Л.Я.* Мульчирование как важный элемент стратегии использования ресурсов естественного увлажнения в агроэкосистемах степного Крыма // *Почвоведение*. 2019. № 3. С. 348–354.
11. Два миллиарда кубометров пресной воды обнаружили под Азовским морем. <https://vesti-k.ru/news/2021/04/30/dva-milliarda-kubometrov-presnoj-vody-obnaruzhili-pod-azovskim-morem/> (дата обращения 15.04.2021)
12. Доклад Министра жилищно-коммунального хозяйства Республики Крым А. Жданова на расширенном заседании Комитета Совета Федерации по федеративному устройству, региональной политике, местному самоуправлению и делам Севера в рамках Дней Республики Крым в Совете Федерации на тему “Состояние, возможности и перспективы развития водоснабжения Республики Крым”. Симферополь: Мин-во жилищно-коммунального хозяйства РК, 2015. 12 с.
13. *Драган Н.А.* Деградационные процессы в почвах Крыма // *Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах. Материалы VI Междунар. науч. конф. / Отв. за вып. П.В. Голусов*. 2015. С. 215–220.
14. *Драган Н.А.* Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: Доля, 2004. 208 с.
15. *Драган Н.А.* Пути оптимизации агроэкологического состояния почвенных ресурсов Степного Крыма // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2013. Т. 9. № 1. С. 69–87.
16. *Драган Н.А.* Сравнительная оценка качества почвенных ресурсов Крыма // *Уч. зап. КФУ. География. Геология*. 2011. №2–1. С. 260–266.
17. *Иванов Н.Н.* Ландшафтно-климатические зоны земного шара. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 224 с.
18. Использование водных ресурсов (водопотребление и водопользование). https://studref.com/399572/ekonomika/ispolzovanie_vodnyh_resursov_vodopotreblenie_vodopolzovanie (дата обращения 14.04.2021)
19. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года на территории Республики Крым. Посевные площади сельскохозяйственных культур и площади многолетних насаждений и ягодных культур. Кн. 2. Структура посевных площадей. Группировки объектов переписи по размеру посевных площадей. Т. IV. Симферополь: Крымстат, 2018. 336 с.
20. Климат степного Крыма // Большой топонимический словарь Крыма. http://kimmeria.com/crimea_placenames/repository/sun_crimea_16.htm (дата обращения 14.04.2021)
21. Климатические условия в Крыму. <http://hikersbay.com/climate-conditions/ukraine/crimea/klimaticheskie-usloviya-v-krym.html> (дата обращения 14.04.2021)
22. *Моисеев Н.Н.* Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987. 304 с.
23. *Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А.* Глобальные оценки изменения составляющих водного баланса суши в связи с возможным изменением климата // Вод. ресурсы. 2021. № 4. 361–377.
24. Новые скважины, опреснение моря и разворот рек: как Крым обеспечат водой. <https://ecologyofrus-sia.ru/stories/krum-voda/> (дата обращения 1.05.2021)
25. Почвы Керченского полуострова от черноземов до солончаков. <https://kerchland.com/pochvy-kerchenskogo-poluostrova-ot-chnozemov-do-solonchakov> (дата обращения 2.07.2021)
26. Почвы Крыма. <https://crimea.ru/pochvy-kruma.htm> (дата обращения 10.05.2021)
27. Проблемы и перспективы инновационного развития сельских территорий Крыма: коллективная монография // НИИСХК. Симферополь: АРИАЛ, 2019. 252 с. DOI

28. Различия и сходства твердой и мягкой пшеницы. <https://ferma.expert/rasteniya/kultury/pshenica/tverdaya-i-myagkaya> (дата обращения 10.07.2021)
29. Республика Крым // Научно-популярная энциклопедия “Вода России”. https://water-rg.ru/Регионы_России/2536/Республика_Крым (дата обращения 10.08.2021)
30. Русейкина Е.С., Кузина О., Магомедов М., Тарасенко В.Э. Устье реки Кубань – Северо-Крымский канал. Вариант переброски пресной воды в Крым // СОК. 2018. № 11. С. 36–39. <https://www.c-o-k.ru/articles/uste-reki-kuban-severokrymskiy-kanal-variant-perebroski-presnoy-vody-v-krum> (дата обращения 10.05.2021)
31. Сафин Х.М. Технология выгодна и требует скорейшего внедрения // Рынок АПК. 10.11.2020. <https://rynok-apk.ru/articles/plants/strip-till-tehnologiya/> (дата обращения 14.04.2021)
32. Сафин Х.М., Шварц Л.С., Фахрисламов Р.С. Технология No-till в системе сберегающего земледелия: теория и практика внедрения. Уфа: Мир печати, 2013. 72 с.
33. Северо-Крымский канал. https://ru.wikipedia.org/wiki/Северо-Крымский_канал (дата обращения 10.05.2021)
34. Сельское хозяйство Крыма. <https://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo-kruma> (дата обращения 11.04.2021)
35. Сельское хозяйство Крыма. Материал из Википедии. https://ru.wikipedia.org/wiki/Сельское_хозяйство_Крыма (дата обращения 10.05.2021)
36. Соколов А.А. Вода: проблемы на рубеже XXI века. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 166 с.
37. Состоялся научно-практический семинар по технологии No-till. Лента новостей Крыма (crimea-news.com). <https://crimea-news.com/society/2021/04/16/782772.html> (дата обращения 10.08.2021)
38. Степной Крым: климат, рельеф, флора и фауна. Границы региона. Интересные места и достопримечательности. <https://fb.ru/article/386415/stepnoy-krum-klimat-relef-flora-i-fauna-granitsyi-regiona-interesnyie-mesta-i-dostoprimechatelnosti> (дата обращения 14.04.2021)
39. Так что же было раньше: обработка или “ноль”? <http://agrotehnology.com/no-till/teoriya/tak-chto-zhe-bylo-ranshe-obrabotka-ili-nol> (дата обращения 14.04.2021)
40. Технология возделывания сельскохозяйственных культур. <https://leksia.com/6xd85b.html> (дата обращения 10.05.2021)
41. Тищенко А.И., Кузьмичев А.А., Пономаренко Т.С. Рациональное использование водных ресурсов Крыма для целей мелиорации // Науч. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2018. № 1 (29). С. 188–207.
42. У моря без воды. Что ждет Крым после засушливой зимы // Огонек. 2020. № 22. <https://im.kommerisant.ru/ISSUES.PHOTO/OGONIOK/2020/022/26-28%20krum-1.jpg> (дата обращения 14.08.2021)
43. Урожайность сельскохозяйственных культур в Республике Крым (пересчитанные данные с учетом итогов ВСХП-2016). Росстат. Симферополь: Управление Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю, 2019. 55 с.
44. Фолсом К. Происхождение жизни. М.: Мир, 1982. 160 с.
45. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 308 с.
46. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе. М.: Мир, 1987. 224 с.
47. No-till сберегает почву и деньги крестьянина. <https://apc-intech.ru/no-till-sberegaet-pochvu-i-dengi-krestyanin> (дата обращения 10.07.2021)
48. Bayer C., Martin-Neto L., Mielniczuk J., Pavinato A., Dieckow J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till // J Soil and Tillage Res. 2006. V. 86. № 2. P. 237–245.
49. Commoner B. The closing circle: Nature, man, and technology. N. Y.: Knopf, 1971. 326 p.
50. Gusev E.M. Evolution of Agricultural Technologies: from “Gray” to “Green” // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1134/S2079096120010060>
51. Gusev E.M. Inevitability and Prospects of the Use of the “Green Farming” Strategy by Humanity // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. № 3. P. 143–149. <https://doi.org/10.1134/S2079096119030041>
52. Gusev Y.M., Dzhogan L.Y., Nasonova O.N. Modelling the impact of mulching the soil with plant remains on water regime formation, crop yield and energy costs in agricultural ecosystems // Proc. IAHS. 2018. V. 376. P. 77–82. <https://doi.org/10.5194/piahs-376-77-2018>
53. Gusev Ye., Novak V. Soil water – main water resources for terrestrial ecosystems of the biosphere // J. Hydrol. Hydromech. 2007. V. 55. № 1. P. 3–15.
54. Hall A., Dorai K. The greening of agriculture. Agricultural innovation and sustainable growth. Brighton, UK: Link Limited, 2010. 60 p.
55. Montgomery D.R. Dirt: Erosion of Civilizations. Berkeley; Los Angeles: Univ. California Press, 2007. 296 p.
56. Montgomery D.R. Is agriculture eroding civilization’s foundation? // GSA Today. 2007. V. 17. № 10. P. 4–9.
57. Morowitz H.J. Energy flow in biology: biological organization as a problem in thermal physics. N.Y.: Acad. Press, 1968. 179 p.
58. Nature-Based Solutions for Water // The United Nations World Water Development Rep. 2018. Paris: UNESCO, 139 p.
59. No-till air drill. <https://www.deere.com/en/seedling-equipment/n550-no-till-air-drill/> (дата обращения 10.09.2021)
60. Sustainable Management of Water Resources in Agriculture. Paris: OECD publ., 2010. 120 p.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 628.17:628.3

**ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ И ВОДООТВЕДЕНИЕ В МУНИЦИПАЛЬНЫХ
ОБРАЗОВАНИЯХ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ И г. СЕВАСТОПОЛЕ:
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ¹**© 2022 г. А. П. Демин^а *, А. В. Зайцева^а, М. А. Харламов^а^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: deminap@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 20.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Проведен анализ статистической информации по забору воды из источников, использованию ее на различные нужды, сбросу сточных вод и загрязняющих веществ в Республике Крым и г. Севастополе за 2014–2020 гг. Выявлено резкое изменение структуры забора пресной воды. Показано влияние оборотного водоснабжения на экономию использования свежей воды для производственных нужд. Представлены данные о росте потерь воды в результате увеличения изношенности водопроводных сетей. Показана динамика постоянного снижения удельного потребления воды на питьевые и хозяйственно-бытовые нужды на курортах Крыма. Проведена оценка изменения объема водопользования на орошаемых землях и изменения структуры использования орошаемых земель. Несмотря на сокращение объема сточных вод, отмечается существенный рост сброса загрязняющих веществ в водные объекты.

Ключевые слова: Крымский полуостров, муниципальные образования, дефицит водных ресурсов, хозяйственно-бытовое и питьевое водоснабжение, удельное водопотребление, оборотное водоснабжение, орошение, сточные воды, сброс загрязняющих веществ.

DOI: 10.31857/S0321059622040034

ВВЕДЕНИЕ

Республика Крым всегда была вододефицитным регионом. Даже после строительства Северо-Крымского канала (СКК) отдельные регионы полуострова испытывали дефицит водных ресурсов.

Водная блокада, введенная Украиной в апреле 2014 г., коренным образом изменила водохозяйственный баланс на полуострове, так как ~85% потребности региона в воде удовлетворялось за счет переброски днепровской воды. Прекратило существование рисоводство, практически исчезло прудовое рыбоводство, в бедственном положении оказались другие водоемкие отрасли экономики.

Обобщающих работ, в которых комплексно анализируются проблемы трансформации водохозяйственного и мелиоративного комплекса Республики Крым в современный период, довольно мало [1, 3, 9, 22]. Большинство публикаций имеет узко региональный характер, исследует фрагментарно отдельные вопросы водного хозяйства и

мелиораций, данные обычно приводятся за небольшое число лет [2, 4, 7, 11–14, 18, 20].

Однако вопросы изменения объемов и структуры водопотребления и водоотведения в Республике Крым, особенностей преобразования промышленного и орошаемого секторов в результате резкого усиления водного дефицита в последнее десятилетие до сих пор остаются недостаточно изученными. Цель данной работы – исследование трансформации водохозяйственного комплекса Крыма в этот период. Важными задачами представляются анализ изменения объемов и структуры водопотребления и водоотведения за последние годы, оценка этих изменений на территориях муниципальных образований Крыма, исследование развития оборотного водоснабжения с целью сокращения потребностей в свежей воде, анализ водообеспечения населения в связи с ростом числа отдыхающих, оценка динамики площади орошаемых сельскохозяйственных угодий. Необходимо показать трансформацию структуры орошаемых сельскохозяйственных угодий в условиях роста дефицита водных ресурсов, распространение водосберегающих техноло-

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9).

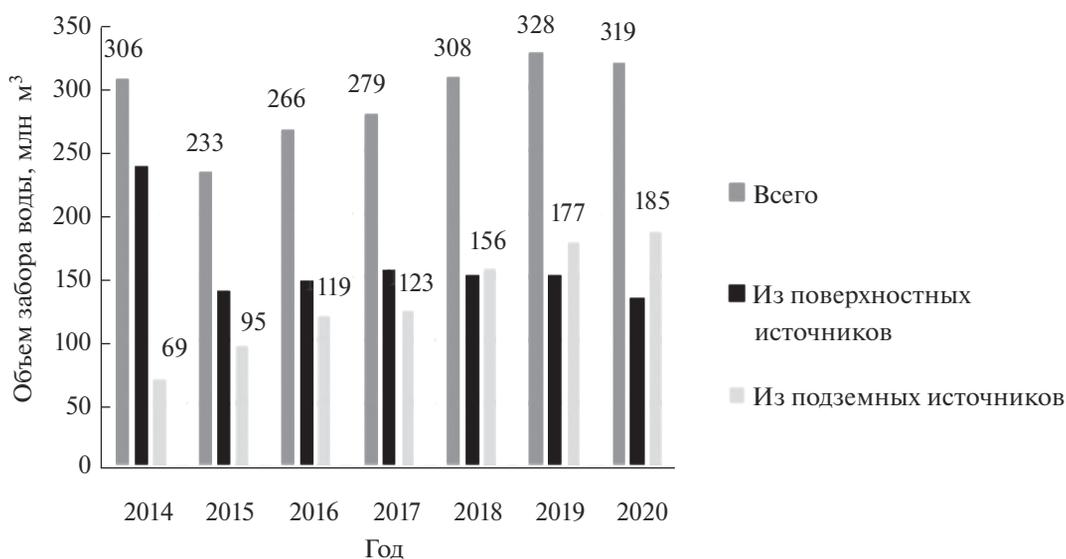


Рис. 1. Динамика забора пресной воды на территории Республики Крым.

гий орошения, в том числе на муниципальном уровне.

В качестве исходных материалов использовались, в первую очередь, данные Росводресурсов, собранные по статистической форме 2-ТП (водхоз). Привлекались материалы Управления федеральной службы госстатистики по Республике Крым и г. Севастополю по состоянию водопроводно-канализационного хозяйства, современным демографическим показателям, информация министерства курортов и туризма Республики Крым по динамике числа отдыхающих. Анализировались статистические материалы Госкомводхоза Республики Крым о наличии и использовании орошаемых земель, проведении поливов, объемах водоподачи, распространении способов и техники полива [6, 15–17, 21].

В соответствии с поставленными задачами исследование проведено на основе системного подхода с использованием следующих методов: 1) аналитического (сбор и систематизация информации по водохозяйственным, демографическим, сельскохозяйственным и другим показателям); 2) специальных (на основе собранных материалов составлены таблицы, построены диаграммы); 3) статистической обработки данных; 4) сравнительного анализа.

ЗАБОР ВОДЫ ИЗ ПРИРОДНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

После перекрытия подачи воды из СКК в 2014 г. властям всех муниципальных образований (МО) понадобилось срочно расширять старые и искать новые источники покрытия потребностей в пресных водных ресурсах. За 2014–2020 гг. забор

пресной воды на территории Республики Крым вырос с 306 до 319 млн м³, или на 4% (рис. 1).

При этом резко изменилась структура забора пресной воды из различных источников. Если в 2014 г. из поверхностных источников забиралось 237 млн м³, то в 2020 г. только 134 млн м³, почти вдвое меньше. В то же время забор воды из подземных источников за эти годы вырос с 69 до 185 млн м³, или в 2.7 раза [6]. Для восполнения потребности в водных ресурсах пришлось строить водозаборы на новых подземных месторождениях и увеличивать производительность на старых.

В городе федерального значения Севастополе объем забора пресной воды за этот период почти не изменился, но и здесь отмечается изменение структуры забора пресной воды, хотя и менее выраженное. За 2014–2020 гг. объем забора воды из поверхностных источников снизился с 40.4 до 32.7 млн м³, или на 19%, а из подземных источников – увеличился с 15.7 до 21.9 млн м³, или на 39%.

По МО Республики Крым отчетность по форме 2-ТП (водхоз) в Росводресурсах имеется начиная с 2016 г. (табл. 1).

Несмотря на такой небольшой срок наличия информации, в отдельных МО произошли существенные изменения объемов забора пресной воды. Так, в пяти МО произошло снижение забора пресной воды на 20–30%, а в Кировском районе – даже в 2.5 раза. Также в пяти МО объем забора воды сократился на 5–20%. В семи МО, на территориях главным образом равнинных степей, забор пресной воды увеличился на 10–40%, а в двух городских округах (ГО) – всего на 2–4%. В трех МО забор пресной воды вырос на 40–80%, а в Нижнегорском, Красногвардейском районах и ГО Фео-

Таблица 1. Объем забранной пресной воды из поверхностных и подземных водных источников в муниципальных образованиях Республики Крым в 2016 и 2020 гг.

Муниципальное образование	Забрано пресной воды из водных объектов в 2016 г., млн м ³			Забрано пресной воды из водных объектов в 2020 г., млн м ³		
	всего	из поверхностных источников	из подземных источников	всего	из поверхностных источников	из подземных источников
Республика Крым	265.83	147.13	118.69	318.97	133.63	185.34
Бахчисарайский район	30.92	22.98	7.94	43.07	27.98	15.09
Белогорский район	4.45	3.67	0.79	5.23	4.11	1.12
Джанкойский район	13.30	0.00	13.30	23.93	0.00	23.93
Кировский район	13.24	10.57	2.67	5.04	2.00	3.04
Красногвардейский район	10.10	1.66	8.44	21.33	3.30	18.02
Красноперекопский район	3.51	0.00	3.51	3.74	0.00	3.74
Ленинский район	24.82	24.31	0.51	22.37	21.34	1.03
Нижнегорский район	15.29	0.00	15.29	30.61	0.18	30.43
Первомайский район	1.59	0.00	1.59	2.83	0.00	2.83
Раздольненский район	3.24	0.00	3.24	3.09	0.00	3.09
Сакский район	5.77	0.00	5.77	6.63	0.00	6.63
Симферопольский район	41.73	37.26	4.47	30.91	24.79	6.13
Советский район	1.42	0.00	1.42	1.88	0.28	1.60
Черноморский район	1.47	0.00	1.47	2.05	0.00	2.05
ГО Симферополь	26.23	25.55	0.69	21.26	20.58	0.68
ГО Алушта	11.94	9.72	2.22	12.23	10.08	2.14
ГО Армянск	14.61	0.00	14.61	26.45	0.00	26.45
ГО Джанкой	3.30	0.00	3.30	3.11	0.00	3.11
ГО Евпатория	16.21	0.00	16.21	19.90	0.00	19.90
ГО Керчь	0.15	0.00	0.15	0.11	0.00	0.11
ГО Красноперекопск	10.04	6.02	4.02	7.63	0.00	7.63
ГО Саки	3.52	0.02	3.50	3.20	0.01	3.19
ГО Судак	2.99	0.29	2.70	3.12	0.37	2.75
ГО Феодосия	0.75	0.00	0.75	15.25	14.98	0.27
ГО Ялта	5.15	5.05	0.10	4.01	3.65	0.36

досия отмечается более чем двукратный рост изъятия воды из источников.

Доля отбора пресной воды из подземных источников в общем изъятии пресной воды в Республике Крым составляет в настоящее время 58.1% против 41.9% изъятия из поверхностных источников. В г. Севастополе на долю подземных вод в 2020 г. приходилось 40% водозабора. В тринадцати из двадцати пяти МО Крыма 99–100% пресной воды забирается только из подземных источников, еще в трех МО – от 85 до 99%. В Кировском районе доля подземных составляет 60, в Бахчисарайском 35, в Белогорском, Симферопольском районах и ГО Алушта – 17–21%. В Ленинском районе, ГО Симферополь, Феодосия, Ялта значительных запасов подземных вод не об-

наружено и доля подземных вод в общем объеме водозабора составляет всего 2–9%.

Если рассматривать объем отбора подземных вод на 1 человека постоянного населения, то при средней величине этого показателя по Республике Крым, равной 266 л/сут, он отличается очень большой вариацией по отдельным МО. Так, в ГО Симферополь, Керчь, Феодосия, Ялта его величина в 2020 г. была ничтожна – на 1 постоянного жителя здесь отбирается воды всего 2–7 л/сут. Жители и отдыхающие в этих курортах снабжаются водой из поверхностных источников. В то же время в ГО Красноперекопск, Джанкойском и Нижнегорском районах из подземных вод отбирают для различных нужд своих жителей и транзита воды 800–1900, а в ГО Армянск >3000 л/сут в расчете на 1 человека.

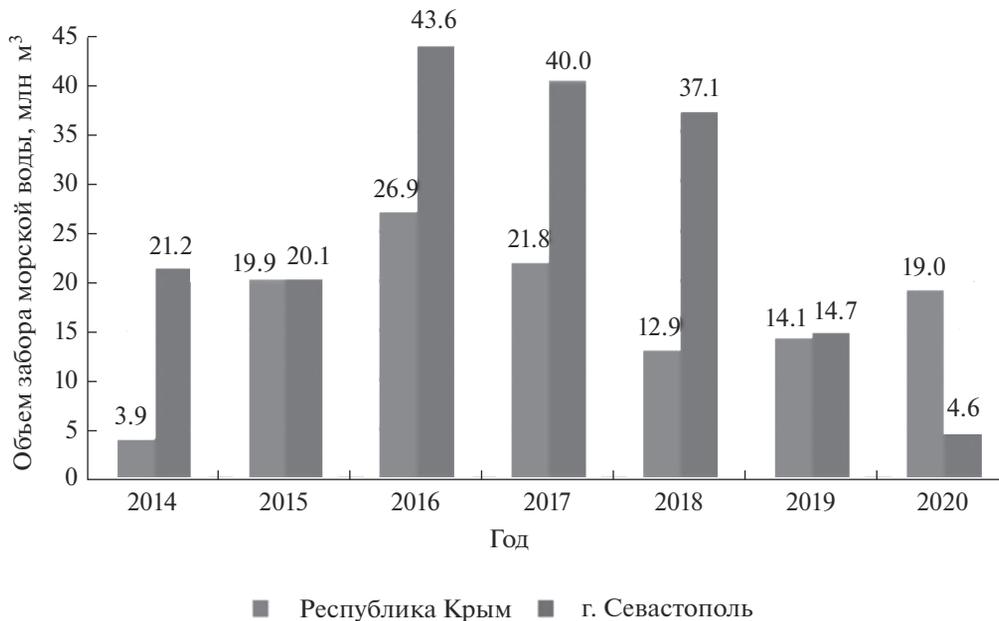


Рис. 2. Динамика объема забора морской воды на территории Республики Крым и г. Севастополя.

Забор морской воды в Республике Крым колебался в анализируемый период в пределах 13–27 млн м³ в год (рис. 2).

Основной (на 80–95%) потребитель морской воды в республике – ГО Керчь. Компания “КрымТЭЦ” построила на Камыш-Бурунской ТЭЦ в Керчи установку для опреснения морской воды. Полученная таким образом вода используется для подпитки теплосети и паровых котлов, что значительно снижает нагрузку на сети городского водоканала. Кроме того, на курортах городов Саки, Ялты, Феодосии морская вода используется для сохранения бальнеологических ресурсов и галургического производства [5].

Ведущий потребитель морской воды в г. Севастополе – предприятие ТОВ “СГС Плюс”, которое занималось теплоснабжением. Морская вода использовалась им для охлаждения конденсаторов турбин [12]. С вводом в эксплуатацию Севастопольской ПГУ-ТЭС (Балаклавская ТЭС) в марте 2019 г. забор морской воды на территории г. Севастополя сократился в 9–10 раз.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ НА РАЗЛИЧНЫЕ НУЖДЫ

Объем используемой пресной воды в Республике Крым после ее вхождения в состав России сначала снижался из-за недостатка воды в источниках водоснабжения и роста потерь воды при ее транспортировке к потребителям, но с 2018 г. вновь стал расти в результате введения в эксплуатацию новых месторождений подземных вод и строительства и реконструкции водохранилищ

поверхностных вод. Всего объем используемых пресных вод в республике снился с 213 млн м³ в 2014 г. до 188 млн м³ в 2020 г., или на 12%. В г. Севастополе объем используемой пресной воды после вхождения Крыма в состав России вырос с 33.5 до 38.2 млн м³ в 2020 г., или на 14%.

Объем используемой на производственные нужды пресной воды во многих МО Крымского п-ова не сильно изменился за период 2016–2020 гг. В шести МО он снизился на 0.01–0.3 млн м³, в одиннадцати – вырос на 0.01–0.3 млн м³. В то же время в ГО Керчь, Ялта, Симферополь, Красноперекоск по разным причинам этот показатель снизился на 1.4–2.4 млн м³, или на 20–35%. В Белогорском и Кировском районах объем водопотребления на производственные нужды вырос на 0.6 млн м³, в ГО Армянск – на 12 млн м³, или в 2 раза. В 2020 г. в шести ГО Крыма (Армянск, Симферополь, Керчь, Красноперекоск, Феодосия, Ялта) потребляется 84% всего объема воды, используемого на производственные нужды республики. Основные отрасли хозяйства, потребляющие воду, – химическое производство, электроэнергетика и ЖКХ.

В 2020 г. обратное и повторно-последовательное водоснабжение применялось в 11 МО и г. Севастополе, что позволяло существенно экономить использование свежей воды на производственные нужды. За 2016–2020 г. использование оборотной воды значительно снизилось в ГО Симферополь и Красноперекоск – (на 93 и 22 млн м³). В то же время оно резко выросло в г. Севастополе после ввода в эксплуатацию Сева-

Таблица 2. О работе водопровода (отдельной водопроводной сети) в Республике Крым

Показатели	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Число водопроводов и отдельных водопроводных сетей, единиц	776	753	755	792	792	791	831
Подано воды в сеть, млн м ³	172.2	177.9	194.0	213.3	216.6	208.2	207.4
Отпущено воды потребителям, млн м ³	97.3	106.5	105.1	103.9	107.3	104.5	104.8
Утечка и неучтенный расход воды, млн м ³	63.2	66.4	83.6	103.1	104.3	97.9	96.8
Доля во всей подаче воды, %	36.7	37.3	43.1	48.3	48.2	47.0	46.6
Протяженность водопроводных сетей, км	13449	13867	14005	13737	14053	13789	13100
в том числе нуждающихся в замене, доля во всей протяженности, %	54.3	56.1	57.7	57.3	56.2	56.5	59.7
Удельный вес замененных сетей в их общей протяженности, %	1.6	0.8	1.2	0.7	0.5	0.8	1.8
Утечки и неучтенный расход воды на 1 км сетей, м ³	4699	4787	5969	7505	7422	7100	7390

стопольской ПГУ-ТЭС. За 2019–2020 гг. объем используемой свежей воды на производственные нужды сократился в Севастополе с 42 до 8 млн м³, а объем обратного водоснабжения вырос с 0.3 до 303 млн м³. Коэффициент водооборота наиболее велик в настоящее время в городах Севастополе, Красноперекоске и Симферополе (97.4, 93.4 и 81.4%).

Республика Крым и г. Севастополь — одни из немногих субъектов РФ, где объемы используемой на хозяйственно-питьевые нужды пресной воды существенно больше, чем на промышленные и сельскохозяйственные нужды. Поэтому рациональное потребление воды в жилищно-коммунальном секторе — важнейшее условие эффективного использования этого дефицитного ресурса.

В Крыму число водопроводов и отдельных водопроводных сетей выросло с 776 в 2014 г. до 831 в 2020 г. (табл. 2), а их установленная производственная мощность увеличилась на 20% [15].

За этот период подача воды в сеть выросла на 20.4%, а отпуск воды своим потребителям — только на 7.7%. Такая ситуация объясняется в первую очередь ростом утечек и неучтенных расходов воды. Потери воды из водопроводной сети и емкостных сооружений включают в себя: расходы воды при авариях и повреждениях в сети до их локализации и при утечке через водоразборные колонки; скрытые утечки воды из сети и сооружений; расходы воды, не оплаченные потребителем, при самовольном пользовании системами коммунального водоснабжения. Неучтенный расход воды включает в себя также воду, использованную на тушение пожаров. По оценкам специалистов предприятия “Вода Крыма”, систематически проводящих мероприятия по выявлению

фактов безучетного водопотребления и несанкционированного подключения к системам водоснабжения, число незаконных врезок не превышает 200–250 случаев в год. Несанкционированный забор воды не превышает нескольких десятых процента объема воды, отпущенной потребителям.

Всего за 6 лет утечки из водопроводной сети Крыма выросли с 63.2 до 96.8 млн м³, или на 53%, а в расчете на 1 км сетей — с 4.7 до 7.4 тыс. м³ (57%). Рост утечек объясняется в первую очередь увеличением изношенности водопроводных сетей в результате малых объемов работ по строительству новых и реконструкции старых сетей (рис. 3). Зависимость величины утечек и неучтенных потерь в расчете на 1 км сетей (y) от изношенности водопроводной сети (x) выражается следующим уравнением регрессии: $y = 455.78x - 19491$, $R^2 = 0.368$.

В Крыму к настоящему времени крайне изношенная коммунальная инфраструктура, требующая огромных затрат на восстановление. К сожалению, в настоящее время не находится достаточно средств для ремонта и строительства водопроводных и канализационных сетей и содержания их в надлежащем состоянии.

За 2014–2020 гг. население Севастополя увеличилось на 30%, в 2020 г. оно превысило 500 тыс. человек. Из крупных городов России это самый быстрорастущий город. Однако работа коммунальных служб не поспевает за ростом населения. За этот период отпуск воды потребителям увеличился только на 10.5%. Ежегодная замена водопроводных сетей колебалась от 1 до 10 км (от 0.1 до 0.9% требующих замены; в 2020 г. — 1.3%).

Максимальная изношенность уличной водопроводной сети характерна для Красноперекоского района (88%) и ГО Джанкой, Саки, Фе-

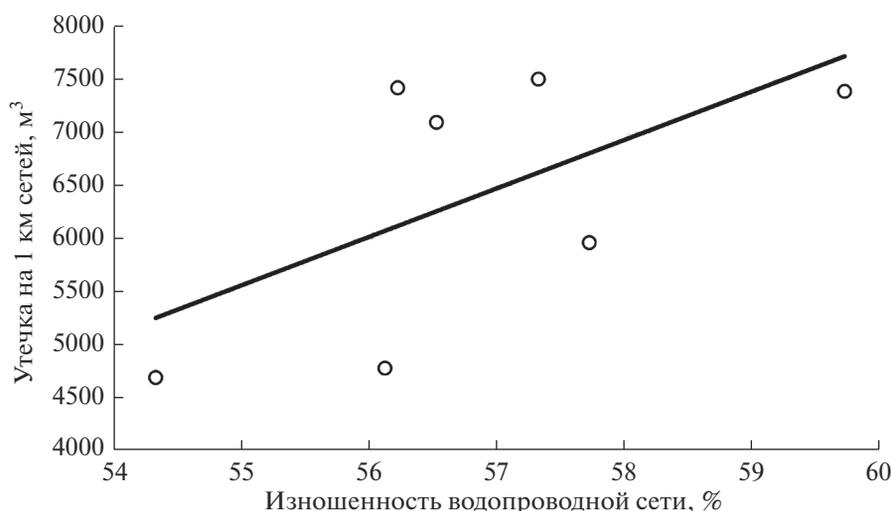


Рис. 3. Рост объемов утечек и неучтенных расходов воды на 1 км водопроводных сетей по мере увеличения изношенности водопроводной сети в Республике Крым в 2014–2020 гг.

одосия, Керчь, Симферополь (>70%) [17]. В отдельных МО в среднем заменяется от 0.1 до 4% уличной сети. Согласно “Единой схеме водоснабжения и водоотведения Республики Крым” [19] за 2018–2030 гг. ежегодный объем строительства и реконструкции уличной сети должен составлять 495 км, или 5.1% протяженности сети. Фактически в 2018 г. было заменено 0.9%, в 2019 г. – 1.1%, в 2020 г. – 2.0% сети. С такими темпами работ “Единая схема”, несомненно, не будет выполнена.

Важно обеспечить туристов и отдыхающих, прибывающих в Республику Крым, питьевой водой высокого качества, особенно тех, кто приезжает на санаторно-курортное лечение. По данным министерства курортов и туризма Республики Крым, поток туристов и отдыхающих в последние годы стремительно нарастает [21]. С 2014 по 2019 г. он вырос с 3.8 до 7.43 млн чел., или почти в 2 раза. В 2021 г. турпоток превысил 9.3 млн человек. В среднем отдыхающий проводит на курорте 21 день, или 0.0575 года. Тогда приведенная численность населения с учетом отдыхающих (т. е. численность постоянного населения, проживающего в данной местности, плюс численность отдыхающих и туристов в данной местности, умноженная на коэффициент 0.0575, и приведенная таким образом к числу постоянных жителей) превышала среднегодовую численность постоянного населения в 2019 г. в Симферополе и окружающих районах на 8%, на восточном побережье – на 20%, на западном побережье – на 38%, а на южном берегу Крыма – в 2.03 раза.

Несмотря на резкое увеличение числа отдыхающих, улучшения водообеспечения постоянного населения и туристов не наблюдается. Более того, отмечается поступательное снижение объемов используемой пресной воды на питьевые и хозяй-

ственно-бытовые нужды; в целом по курортной зоне Крыма он сократился за 2015–2019 гг. на 5.7%. В Симферополе и окружающих районах он снизился за этот период на 3.1, на Южном берегу Крыма – на 4.6, на западном побережье – 6.8, на восточном побережье – на 10.5%. В результате отмечается резкое снижение удельного потребления воды на питьевые и хозяйственно-бытовые нужды на всех курортах (рис. 4).

В курортной зоне на западном побережье среднесуточное водопотребление постоянного населения и отдыхающих снизилось за пять лет с 122 до 100 л, в Симферополе, Симферопольском и Бахчисарайском районах – с 119 до 111 л. Худшее положение среди курортов отмечается на самом популярном Южном берегу Крыма и маловодном восточном побережье, где в 2020 г. в среднем в сутки потреблялось всего 86 л, тогда как по нормативам необходимо 140–160 л.

В целом по Республике Крым среднесуточное водопотребление населения с учетом роста количества отдыхающих за 2014–2020 гг. снизилось с 129 до 100 л (на 28%), а в г. Севастополе в результате резкого роста постоянного населения и одновременного ухудшения водоснабжения – с 184 до 116 л (на 37%).

Максимальное количество отдыхающих на Крымском п-ове отмечается в июле и августе. Местные водоканалы учитывают это обстоятельство и наращивают объем водоподачи в пиковый период. Так, на Южном берегу Крыма в третьем квартале среднесуточный отпуск воды потребителям организациями коммунального комплекса в 2.5 раза превышает аналогичный показатель первого квартала [16]. В то же время население увеличивается за счет отдыхающих еще больше. Так, в Алуште в июле–августе 2019 г. население

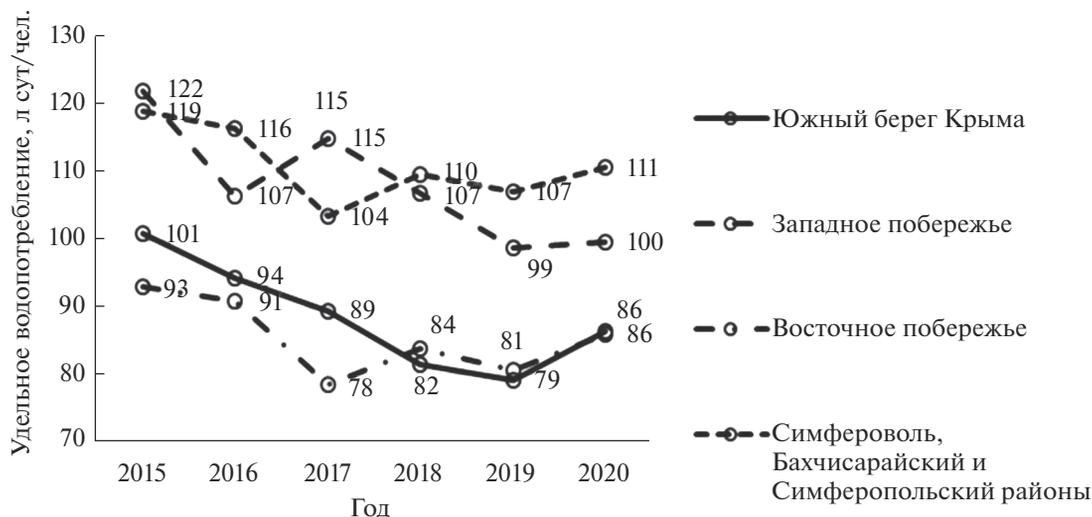


Рис. 4. Динамика удельного потребления воды на питьевые и хозяйственно-бытовые нужды в среднем за год на курортах Крыма с учетом отдыхающих.

возрастало в 5.6–6 раз по сравнению со среднегодовой величиной. Это привело к тому, что, несмотря многократный рост водоподачи, удельное среднесуточное водопотребление снижалось до 40 л/сут на человека.

Правительство РФ и Правительство Республики Крым намерены превратить Крымский п-ов с его уникальными природными ресурсами во все-российскую здравницу, отвечающую самым высоким стандартам. Для этого нужно в достаточно близкой перспективе решить задачу улучшения водообеспечения населения и отдыхающих.

В последние годы до прекращения поступления воды из СКК на сельскохозяйственные нужды использовалось 530–570 млн м³ воды и сельское хозяйство было основным потребителем воды [9]. С 2014 г. объем использования воды на нужды орошения на Крымском п-ове стал резко сокращаться, в 2016 г. он достиг своей минимальной величины (10.4 млн м³) и лишь потом стал понемногу расти.

В 2013 г. было полито ~137 тыс. га из почти 400 тыс. га имеющихся орошаемых земель. На следующий год площадь полива сократилась в 7.7 раза – до 17.7 тыс. га. В 2015 г. было полито всего 10.7 тыс. га орошаемых земель – минимальная величина за все годы наблюдений. Постепенно площадь полива стала увеличиваться, достигнув в 2020 г. 21.5 тыс. га. Отрадно, что кратность полива стала расти. В последние годы она превышает пятикратную величину, что позволяет более точно регулировать водный режим орошаемых сельскохозяйственных культур. Удельная водоподача на 1 комплексный гектар орошаемых земель снизилась в 3.5–4.5 раза в связи с резким изменением структуры поливаемых земель.

После закрытия СКК площадь полива под овощами, бахчевыми и картофелем сократилась в два раза, под кормовыми культурами – в 7 раз. Максимально сократилась поливаемая площадь под техническими и зерновыми культурами – соответственно в 38 и 42 раза. Рис, самую влаголюбивую культуру, в Республике Крым возделывать перестали. Однако площадь полива под самыми ценными многолетними насаждениями в 2020 г. превысила аналогичный показатель 2013 г. В настоящее время на поливаемых землях площадь многолетних насаждений превышает 60%, а площадь под овощами, бахчевыми и картофелем составляет почти десятую часть. Острый дефицит воды не позволяет увеличить площади полива под кормовыми культурами для возрождения животноводства и под ценными техническими культурами.

Площадь поливаемых земель под сельскохозяйственными культурами в МО менялась в последние годы в зависимости от объема свободных водных ресурсов для полива. За короткий период 2014–2020 гг. она снизилась в Белогорском, Краснопереконском районах и г. Севастополе в 2–4 раза. В Джанкойском и Нижнегорском районах площадь полива снизилась на треть (табл. 3).

В целом по Крымскому п-ову площадь полива за шесть лет увеличилась на 21% (3.7 тыс. га). В настоящее время в Симферопольском и Сакском районах поливается по ~2 тыс. га, а в Бахчисарайском и Красногвардейском районах – по ~4 тыс. га. На эти районы приходится >56% поливаемых площадей полуострова.

Резкий рост дефицита воды в сельском хозяйстве привел к стремительному развитию самого экономного способа полива – капельного. Если

Таблица 3. Площадь фактически политых земель в муниципальных образованиях Республики Крым и г. Севастополе, га

Муниципальные образования	Полито в 2014 г., га		Полито в 2020 г., га		Соотношение площадей 2020/2014, %	
	всего	в том числе капельный полив	всего	в том числе капельный полив	всего полито	площадь капельного полива
Бахчисарайский район	3559	1867	3981	3943	112	211
Белогорский район	1375	70	649	649	47	927
Джанкойский район	1233	472	830	530	67	112
Кировский район	93	42	821	740	883	1761
Красногвардейский район	1435	486	4076	2745	284	565
Красноперекопский район	1676	402	489	119	29	30
Ленинский район	0	0	120	115	–	–
Нижнегорский район	1850	480	1218	981	66	204
Первомайский район	1354	63	1411	401	104	640
Раздольненский район	221	176	315	215	143	122
Сакский район	270	140	2077	1973	769	1409
Симферопольский район	2044	675	1971	1129	96	167
Советский район	0	0	712	59	–	–
Черноморский район	0	0	163	163	–	–
ГО Алушта	1426	270	1458	274	102	101
ГО Ялта	147	0	251	10	171	–
ГО Судак	614	210	781	399	127	190
ГО Феодосия	0	0	30	30	–	–
г. Севастополь	420	0	108	108	26	–
Итого	17717	5352	21461	14475	121	270

за шесть лет совокупная площадь полива увеличилась на 21%, то под капельным способом – на 170%. В 2014 г. капельным способом поливалось 30% орошаемых земель полуострова, в 2020 г. >67%. В большинстве МО капельным способом сейчас поливается более половины орошаемых земель, а в Белогорском, Черноморском районах, ГО Феодосия и г. Севастополе – 100%.

СБРОС СТОЧНЫХ, ТРАНЗИТНЫХ И ДРУГИХ ВОД

Крым вернулся в состав России, имея неблагоприятные экологические условия – загрязнение и истощение природных ресурсов, накопление токсичных промышленных и бытовых отходов, химическое и микробное загрязнение курортно-рекреационных ресурсов и другие последствия антропогенного давления на окружающую среду [1].

За 2014–2020 г. сброс сточных, транзитных и прочих вод на территории Республики Крым вырос со 175 до 185 млн м³, или на 5.5%. При этом заметно изменилась структура сброса сточных и

прочих вод. В 2014 г. в поверхностные водные объекты сбрасывалось 91.3% объема воды, а в накопители, поля фильтрации, рельеф местности – только 8.7%. К 2020 г. доля сброса в накопители и на рельеф повысилась почти вдвое (до 15.3%).

Объем сброса сточных вод в городе федерального значения Севастополе сначала повысился до 67.2 млн м³ в 2016 г., но затем стал поступательно снижаться и достиг в 2020 г. 30.1 млн м³. Произошло это главным образом за счет развития оборотного водоснабжения и заметного снижения использования воды на производственные нужды. Подавляющая часть сточных вод сбрасывается в поверхностные водные объекты города и лишь 0.1–0.3% в накопители, поля фильтрации и рельеф местности.

Сброс транзитной воды за этот период в Республике Крым увеличился в 2.2 раза. В 2016 г. он осуществлялся только в Кировском районе, а в 2020 г. (как и в предыдущие два года) – в Ленинском районе и ГО Феодосия. Сброс воды в накопители, на поля фильтрации и на рельеф местности увеличился в республике на 24%. Более чем в

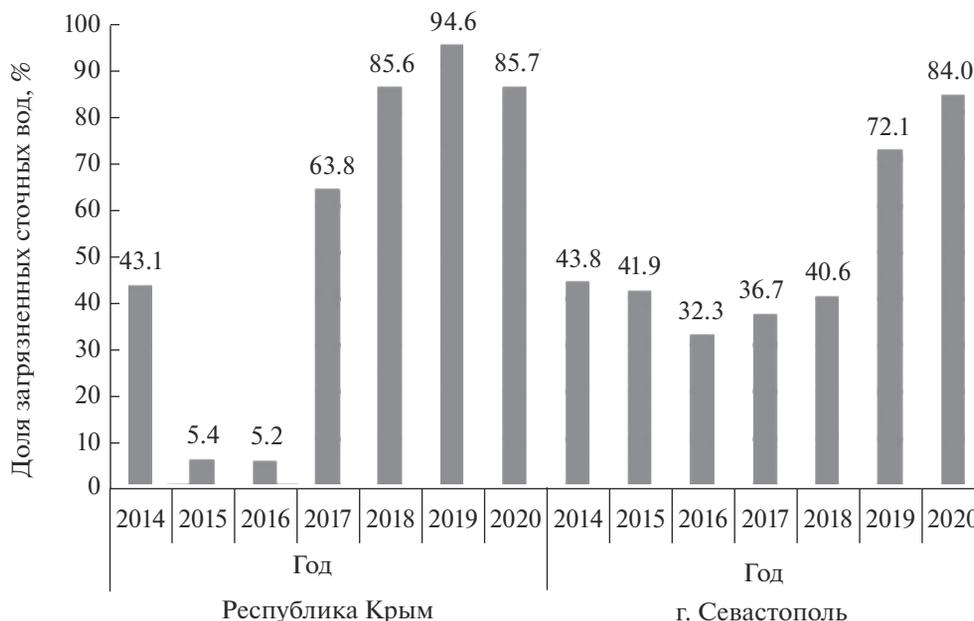


Рис. 5. Доля загрязненных сточных вод в общем объеме сброса воды в природные поверхностные водные объекты.

четыре раза он увеличился в ГО Керчь и в 2.3 раза в ГО Армянск. 82% объема вод, сброшенных в накопители, на поля фильтрации, приходится на промышленный г. Армянск.

В результате сокращения объема используемой свежей воды сброс сточных вод в поверхностные водные объекты Республики Крым сократился за шесть лет с 120.7 до 113.1 млн м³ (на 6.3%), а в г. Севастополе – на 31% (на территории Крыма нет шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод). Значительную часть отводимых после использования вод составляют загрязненные сточные воды. Их доля в общем объеме отводимых сточных вод сначала снизилась до 5%, но с 2017 г. стала расти и достигла 86% к 2020 г. В г. Севастополе этот показатель повысился до 84% (рис. 5). Анализ сброса загрязняющих веществ (ЗВ) в составе сточных вод, проведенный ниже, показывает, что есть серьезные основания сомневаться в достоверности отнесения сточных вод к различным категориям загрязнения в 2015 и 2016 гг.

Сброс сточных вод в поверхностные водные объекты по отдельным МО сильно изменился. За 2016–2020 гг. он увеличился в ГО Симферополь в 2.5 раза, в Красногвардейском, Красноперкопском и Ленинском районах – в 1.6–1.8 раза. В то же время сброс сточных вод сократился в Джанкойском районе и ГО Евпатория, Керчь, Саки в 2–6 раз. В остальных МО он как увеличился, так и уменьшился в пределах 20% (табл. 4).

Объем загрязненных сточных вод в Республике Крым увеличился с 7 млн м³ в 2016 г. до 97 млн м³ в 2020 г., или в 14 раз. В четырех МО (Джанкой-

ский, Первомайский, Раздольненский, Советский районы) загрязненные сточные воды не сбрасывались в поверхностные водоемы ни в 2016 г., ни в 2020 г. В ГО Армянск и Красноперкопск их отводят в накопители и хвостохранилища. В Ленинском, Сакском районах, ГО Алушта и Феодосия объем загрязненных сточных вод увеличился на 5–10 млн м³, в ГО Ялта – на 17.5, а в Симферопольском районе – на 36 млн м³.

Практически во всех городах и поселках сложилась крайне сложная обстановка с отведением и очисткой сточных вод. Существующие канализационные очистные сооружения и сети морально и технически устарели, работают с большой перегрузкой, не обеспечивают должной степени очистки стоков, что приводит к загрязнению водных объектов и ухудшению состояния окружающей среды в большинстве населенных пунктов [8, 11].

Основные приемники загрязненных сточных вод – р. Салгир, Черное море и зал. Сиваш Азовского моря. Главные загрязнители, сбрасывающие загрязненные сточные воды, – объекты коммунального хозяйства [10].

В подавляющем большинстве МО в настоящее время наблюдается неблагоприятное соотношение загрязненных и нормативно-чистых вод. Лишь в упоминавшихся выше шести МО и ГО Евпатория в 2020 г. не проводился сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водоемы. В ГО Керчь их доля крайне мала (0.5%). Во всех остальных МО доля загрязненных сточных вод в общем объеме сбрасываемых в поверхностные водные объекты стоков составляет 90–100%. До

Таблица 4. Объем сброшенной сточной воды в муниципальных образованиях Республики Крым в 2016 и 2020 гг.

Муниципальное образование	Сброшено сточной воды в 2016 г., млн м ³				Сброшено сточной воды в 2020 г., млн м ³			
	всего	загрязненной	нормативно чистой	нормативно очищенной	всего	загрязненной	нормативно чистой	нормативно очищенной
Республика Крым	134.7	6.97	32.62	95.11	113.05	96.87	14.52	1.66
Бахчисарайский район	1.09	0.04	0.00	1.05	0.78	0.78	0.00	0.00
Белогорский район	0.58	0.00	0.00	0.58	0.75	0.75	0.00	0.00
Джанкойский район	1.79	0.00	0.00	1.79	0.29	0.00	0.29	0.00
Кировский район	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.15	0.00	0.00
Красногвардейский район	0.81	0.81	0.00	0.00	1.29	1.29	0.00	0.00
Краснопереконский район	0.94	0.00	0.00	0.94	1.73	1.73	0.00	0.00
Ленинский район	4.64	0.51	4.13	0.01	8.08	8.08	0.00	0.00
Нижнегорский район	0.20	0.00	0.00	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00
Сакский район	0.00	0.00	0.00	0.00	10.33	10.33	0.00	0.00
Симферопольский район	41.86	0.00	0.97	40.90	36.05	36.05	0.00	0.00
Советский район	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.11
Черноморский район	0.23	0.23	0.00	0.00	0.20	0.20	0.01	0.00
ГО Симферополь	0.39	0.00	0.39	0.00	0.97	0.97	0.00	0.00
ГО Алушта	7.03	0.02	0.46	6.55	6.68	6.66	0.00	0.01
ГО Джанкой	0.00	0.00	0.00	0.00	1.85	1.85	0.00	0.00
ГО Евпатория	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
ГО Керчь	31.80	0.09	26.61	5.10	14.58	0.12	13.32	1.15
ГО Саки	12.39	2.32	0.00	10.06	1.99	1.99	0.00	0.00
ГО Судак	1.49	1.49	0.00	0.00	1.73	1.73	0.00	0.00
ГО Феодосия	8.67	1.35	0.00	7.31	7.10	6.41	0.65	0.04
ГО Ялта	20.77	0.08	0.07	20.62	18.18	17.59	0.24	0.35

нормативов в Республике Крым в 2020 г. очищалось только 1.66 млн м³ сточных вод, или 1.7% общего объема, требующего очистки. В г. Севастополе эти показатели еще хуже — соответственно 0.13 млн м³ и 0.5%.

В связи со снижением объемов отводимых сточных вод, изменением их качественного состава, ростом мощности очистных сооружений значительный интерес представляет анализ динамики сбросов ЗВ. Отмечается существенный рост сброса большинства ЗВ в водные объекты в 2020 г. по сравнению с 2014 г. (рис. 6).

Так, сброс фосфатов и БПК_{полн} в составе сточных вод увеличился за этот короткий период в Республике Крым на 38–41, железа и сухого остатка — на 20–28, сброс взвешенных веществ и ХПК — на 56–57%. Сброс сульфатов и хлоридов снизился соответственно на 13 и 17, нефтепродуктов — на 30%. Сброс нитратов и нитритов сократился очень незначительно — на 3 и 7% соответственно.

Еще более разительные изменения отмечают в г. Севастополе. При значительном сокращении сброса сточных вод в поверхностные водные объекты по нефтепродуктам и сухому остатку отмечается многократный рост сброса загрязнений: по железу, взвешенным веществам, меди — в 2–3 раза, по сульфатам и хлоридам — рост на 50–60, БПК_{полн} и ХПК — на 12–22%, по нитратам и нитритам — снижение на 15–30%, лишь по фосфатам — сокращение в 3 раза. Таким образом, антропогенная нагрузка на водные объекты г. Севастополя за короткий период сильно выросла. Это приводит к тому, что качество вод поверхностных водных объектов г. Севастополя и Республики Крым в целом не только не улучшается, но и заметно ухудшается.

В связи с тем, что на территории Республики Крым отмечается тенденция заметного роста объема сброса основных ЗВ в поверхностные водные объекты, а также ухудшения качества их вод, вызывает сомнение достоверность опубликованной в 2015 и 2016 гг. информации об отнесении

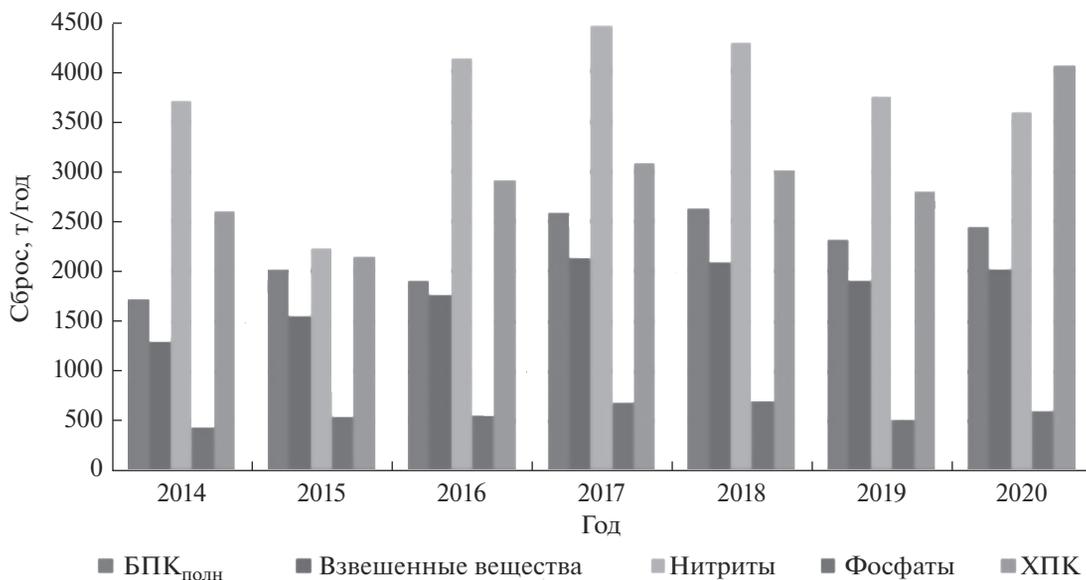


Рис. 6. Объем сброса некоторых загрязняющих веществ в составе сточных вод в Республике Крым.

сточных вод к различным категориям загрязнений. Ни в 2015 г., ни в 2016 г. не наблюдалось резкого снижения сброса основных ЗВ в составе сточных вод по сравнению с соседними годами, как и резкого повышения эффективности работы очистных сооружений. Поэтому нет оснований утверждать, что в эти годы сброс загрязненных сточных вод сократился в 12–13 раз по сравнению с соседними годами, а сброс нормативно очищенных и нормативно чистых сточных вод вырос в 2–3 раза.

Для дальнейшего изучения проблем водообеспечения населения и объектов экономики Республики Крым и г. Севастополя необходимо проведение исследований в следующих направлениях:

сбор и систематизация данных об обеспечении населения централизованным водоснабжением и безопасной питьевой водой;

анализ актуальных программ социально-экономического развития и соответствующих документов с точки зрения потребностей в водных ресурсах и воздействия на их формирование;

прогнозы использования водных ресурсов при различных сценариях водопотребления в экономике Крыма.

ВЫВОДЫ

Выявлено резкое изменение структуры забора пресной воды из различных источников. За 2014–2020 гг. забор воды из поверхностных источников в Республике Крым снизился в 1.8 раза, а забор воды из подземных источников увеличился в 2.7 раза. Показано, что оборотное и повторно-последо-

вательное водоснабжение позволяет существенно экономить использование свежей воды на производственные нужды. В современных условиях значения коэффициента водооборота наиболее высоки в городах Севастополе, Симферополе, Красноперекоске.

За 2014–2020 гг. утечки и потери в водопроводной сети Крыма выросли на 53%, а в расчете на 1 км сетей – на 57%. Увеличение утечек связано с увеличением изношенности водопроводных сетей в результате малых объемов работ по строительству новой сети и реконструкции старых.

Приведены данные по стремительному росту числа туристов и отдыхающих в Крыму в последние годы. Показана динамика устойчивого снижения удельного потребления воды на питьевые и хозяйственно-бытовые нужды в среднем за год на курортах Крыма. Несмотря на увеличение подачи воды водоканалами в несколько раз в июле–августе по сравнению с весенним периодом, удельное среднесуточное водопотребление снижается в этот период на отдельных курортах до критических отметок (в 2–3 раза по сравнению с нормативами и ниже).

Проведена оценка изменения объема водопользования на орошаемых землях и изменения структуры используемых орошаемых земель по группам сельскохозяйственных культур. После перекрытия СКК площадь поливаемых земель сократилась в 7–8 раз. Однако площадь полива под самыми ценными многолетними насаждениями в 2020 г. превысила аналогичный показатель за 2013 г. Резкий рост дефицита воды в сельском хозяйстве привел к стремительному распростра-

нению самого экономного способа полива – капельного.

В результате сокращения объема используемой свежей воды сброс сточных вод в поверхностные водные объекты снизился за 6 лет в Республике Крым на 6%, а в г. Севастополе – на 31%. В Республике Крым по большинству ЗВ отмечается существенный рост их сброса в водные объекты в 2020 г. по сравнению с 2014 г. (на 30–60%). В г. Севастополе при значительном сокращении сброса сточных вод отмечается многократный рост сброса нефтепродуктов и сухого остатка; 2–3-кратное увеличение сброса взвешенных веществ, железа, меди; на 50–60% – сброса сульфатов и хлоридов. Антропогенная нагрузка на водные объекты Крымского п-ова за короткий период сильно выросла, что приводит к ухудшению качества вод поверхностных водных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боровой Е.П., Ходяков Е.А., Кременской В.И., Джапарова А.М.* Этапы развития капельного орошения в Крыму // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 2 (58). С. 29–39.
2. *Василенко В.А.* Водные ресурсы – сдерживающий фактор социально-экономического развития Крыма // Регион: Экономика и социология. 2019. № 4. С. 245–267.
3. *Василенко В.А.* Крым: водный кризис и экологические проблемы // ЭКО. 2016. № 9. С. 60–78.
4. *Волкова Н.Е., Захаров Р.Ю.* Об использовании сточных вод для целей орошения // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2018. № 4. С. 123–128.
5. *Волченко В.А., Тарасенко В.С., Васенко В.И.* О сохранении бальнеологических ресурсов и перспективах развития города курорта Саки // Человек-природа-общество: теория и практика безопасности жизнедеятельности, экологии и валеологии. 2019. № 5 (12). С. 95–100.
6. Данные наблюдений за объемом вод при водопотреблении и водоотведении на всех водных объектах (по форме 2-ТП (водхоз)) // Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. [Электронный ресурс], <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=513> (дата обращения: 10.11.2021)
7. *Демин А.П.* Проблемы обеспечения населения Крымского федерального округа безопасной питьевой водой // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017. Сб. ст. материалов науч.-практ. конф. с международ. участием / Под. ред. Ю.А. Омельчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 354–359.
8. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2017 году. [Электронный ресурс]. https://meco.rk.gov.ru/uploads/meco/attachments//d4/1d/8c/d98f00b204e9800998ecf8427e/phpqQN7fN_-dokl.pdf (дата обращения: 07.10.2021)
9. *Думнов А.Д., Рыбальский Н.Г., Муравьева Е.В.* Водопользование в Крыму: ретроспективные тенденции развития и некоторые оценки на перспективу // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2017. № 3. С. 17–23.
10. *Иванютин Н.М., Подовалова С.В.* Загрязнение водных объектов Крыма сточными водами // Экология и строительство. 2018. № 1. С. 4–8.
11. *Кобечинская В.Г., Ярош О.Б.* Экологические проблемы рационального водопользования в Республике Крым: динамика и перспективы // Вестн. Московского гос. обл. ун-та. Сер. Естественные науки. 2017. № 2. С. 42–49.
12. *Ляшевский В.И., Вердыш М.В., Кременской В.И.* Изучение возможностей использования очищенных сточных вод для орошения в Крыму // Таврический вестн. аграрной науки. 2016. № 4 (8). С. 121–129.
13. *Ляшевский В.И., Джапарова А.М.* К проблеме опреснения морской воды в Крыму // Таврический вестн. аграрной науки. 2015. № 1 (3). С. 63–68.
14. *Николенко И.В., Копачевский А.М.* Основные направления разработки комплекса мер по решению проблем дефицита воды в Крыму // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 21. С. 147–160.
15. Объекты инфраструктуры муниципальных образований: сборник. Симферополь: Крымстат, 2020. 411 с.
16. О работе водопровода (отдельной водопроводной сети) в Республике Крым. [Электронный ресурс]. <http://crimea.gks.ru> (дата обращения: 12.11.2021)
17. О работе организаций в сфере жилищно-коммунального хозяйства Республики Крым в условиях реформы в 2017 году. Бюлл. Симферополь: Крымстат, 2018. 41 с.
18. *Пономаренко Т.С., Бреева А.В.* Водопользование Республики Крым в условиях дефицита // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2021. № 2. С. 77–82.
19. Постановление Совета министров Республики Крым от 26 декабря 2017 года № 714 “Об утверждении единой схемы водоснабжения и водоотведения Республики Крым”. [Электронный ресурс]. <https://rk.gov.ru/gu/document/show/2969> (дата обращения: 11.11.2021)
20. *Сейтумеров Э.Э.* Актуальные проблемы водообеспечения Крыма // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2017. № 2. С. 21–27.
21. Статистические данные о количестве туристов, посетивших Республику Крым. [Электронный ресурс]. <https://mtur.rk.gov.ru/gu/structure/14> (дата обращения: 10.10.2021)
22. *Тарасенко В.С., Паштейцкий В.С., Дунаева Е.А. и др.* Стратегия развития водохозяйственно-мелиоративного комплекса Республики Крым // Тр. Крымской АН. Симферополь: Ариал, 2019. С. 5–26.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
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^а, *, А. М. Копачевский^б, Э. А. Каримов^с**^аИнститут “Академия строительства и архитектуры” КФУ им. В.И. Вернадского”,
Симферополь, 295493 Россия^бНаучно-производственная фирма “Водные технологии”,
Симферополь, 295000 Россия^сСимферопольский 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 многолетних 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 циклические 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 общедоступными, 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 м³ 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 $\geq 40\%$ 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 –

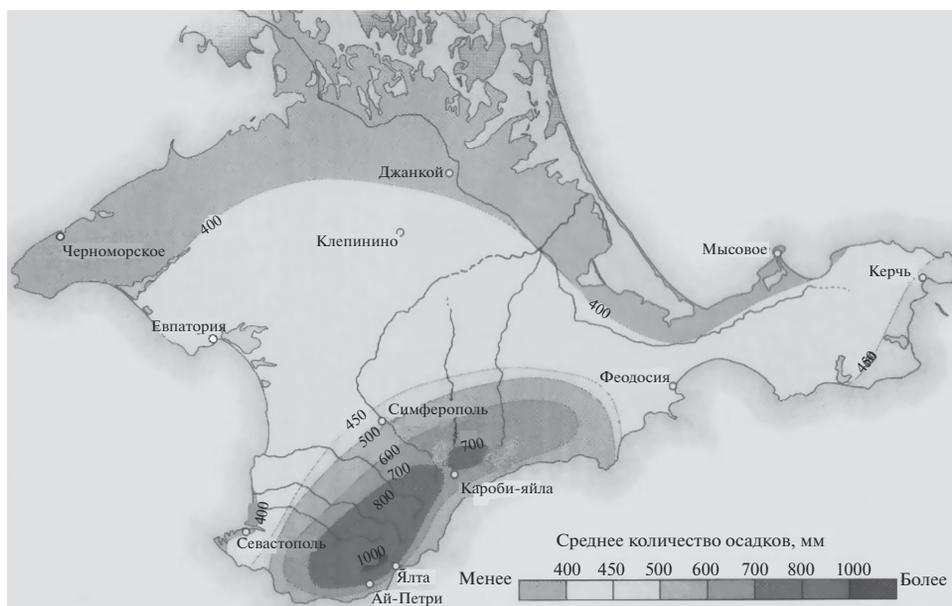


Рис. 1. Картограмма территории распределения средних осадков в Крыму в мм.

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 обуславливает 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 м³. 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 м³. 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 м³ и 1922 пруда общим объемом 216 млн м³. 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

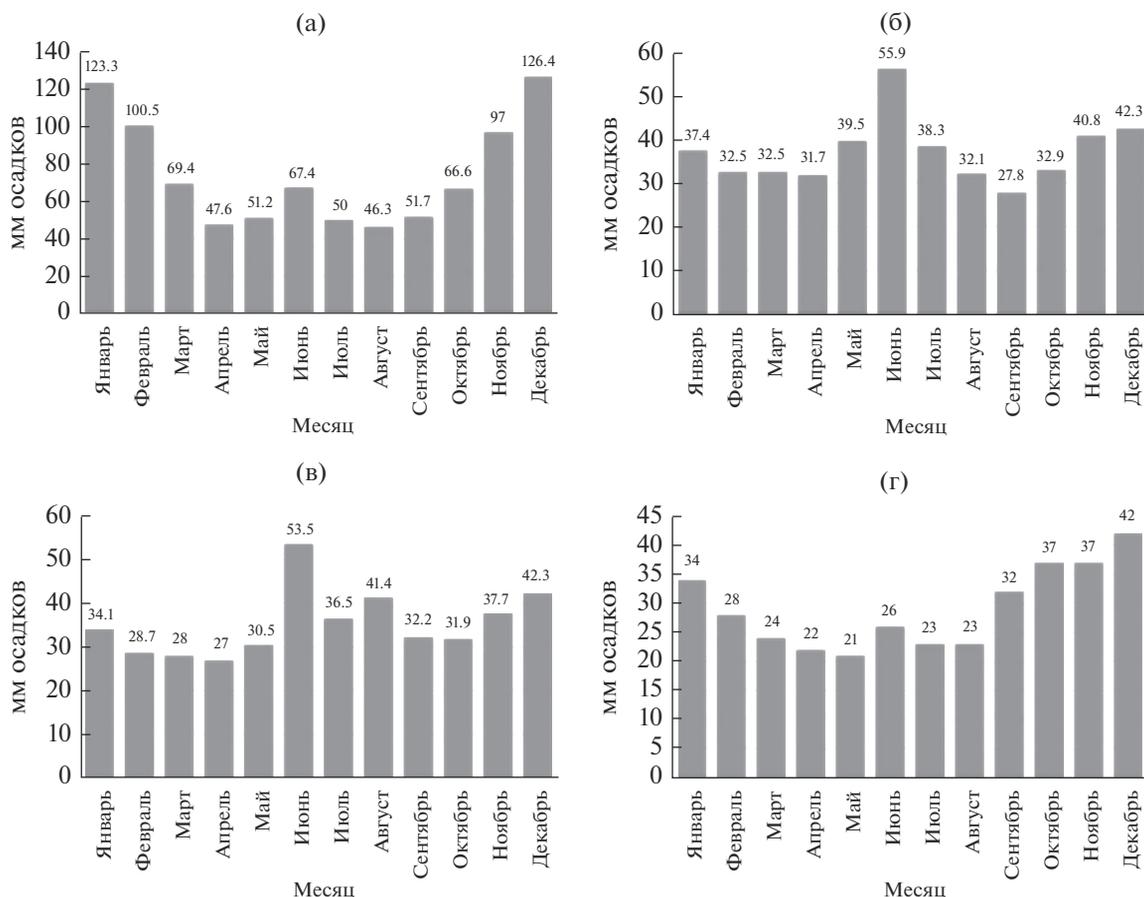


Рис. 2. Диаграммы средних многолетних месячных сумм осадков: а – Ай-Петри, б – Симферополь, в – Керчь, г – Севастополь.

за этот период в водохранилища естественного стока составил 270 млн м³, а средний приток в наливные водохранилища СКК за период с 1989 по 2013 г. – 140 млн м³. Расчетный период был выбран с учетом функционирования всех наливных водохранилищ, в том числе Межгорного с полным объемом 50 млн м³. 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 м³ (1997 г.), а минимальный приток – 97 млн м³ (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 аккумуляции вод подземных водозаборов и части стока р. Биюк-Карасу с величиной годовых притоков 38–56 млн м³.

Циклические 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-

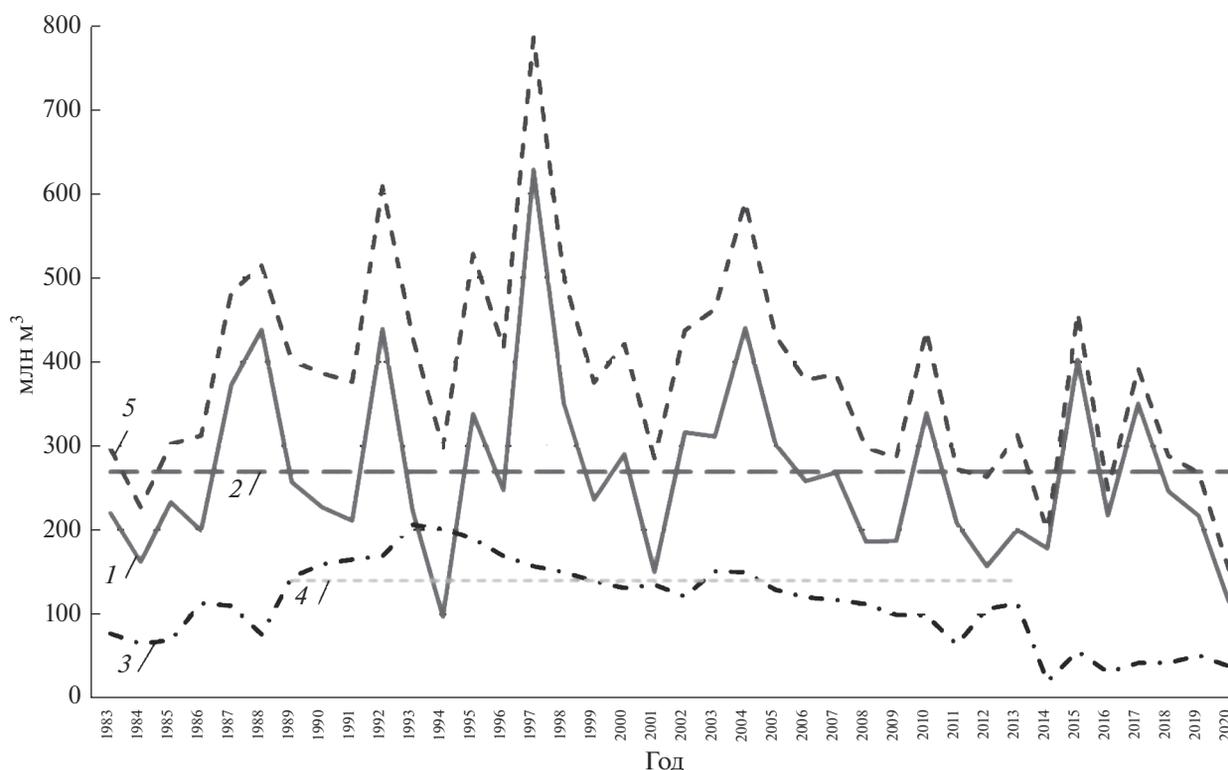


Рис. 3. Годовой приток (млн м³) в водохранилища Крыма за 1983–2020 гг.: 1 – суммарный приток в водохранилища естественного стока, 2 – средний суммарный приток в водохранилища естественного стока, 3 – приток в водохранилища СКК, 4 – средний приток в водохранилища СКК, 5 – суммарный приток в водохранилища 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 временного хода минимального наполнения соответствует 1994 г. – самому маловодному году по осадкам за рассмотренный период наблюдений. Из анализа представленного на рис. 4 временного 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 м³.

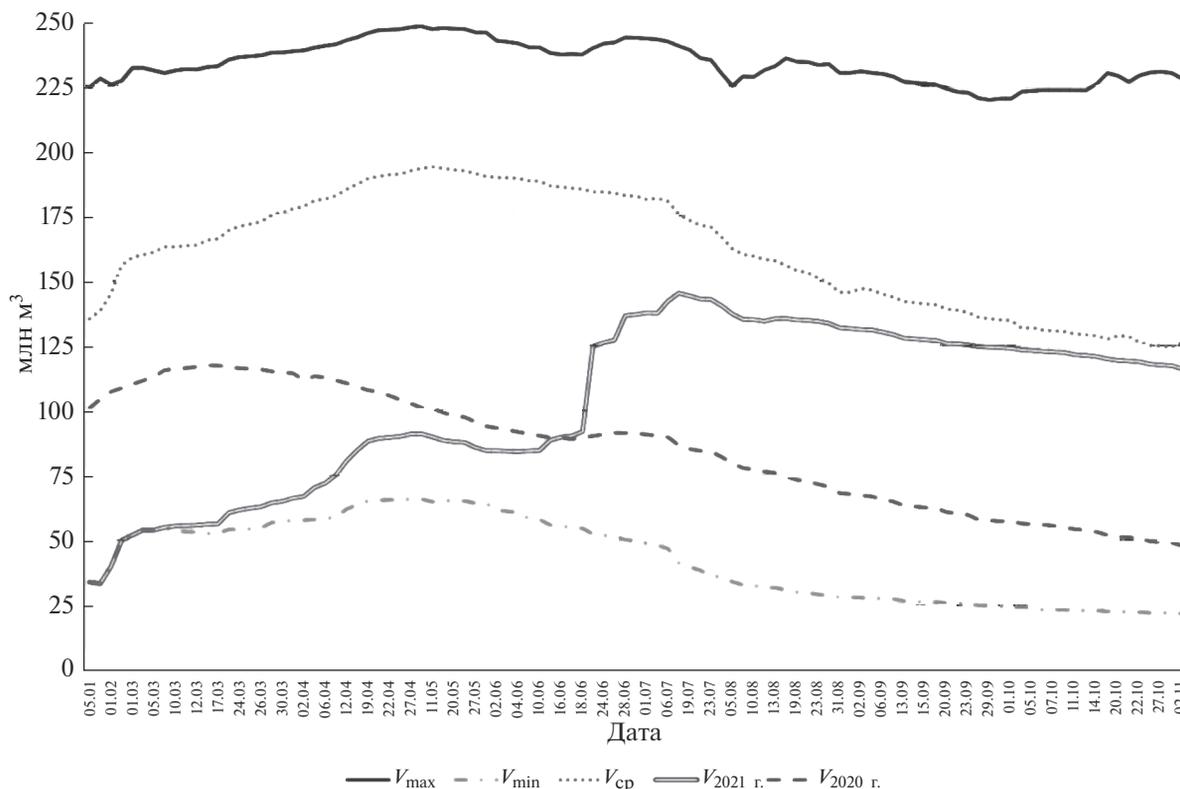


Рис. 4. Временной ход наполнения V водохранилищ естественного стока Крымского п-ова.

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% среднегогодового 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 м³;

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:

$$W_{cpi} = (W_{maxi}^* + W_{mini}) / 2, \tag{1}$$

W_{maxi}^* – максимальные суточные объемы наполнения водохранилищ при отсутствии сброса из них; W_{mini} – минимальные суточные объемы наполнения водохранилищ.

Многолетние суточные величины W_{cpi} и W_{mini} известны из данных Крыммелиоводхоза. По формуле (1) выполним оценку расчетной величины максимальных суточных объемов наполнения водохранилищ при отсутствии сброса из них по зависимости:

$$W_{max\ расч i} = 2W_{cpi} - W_{mini}, \tag{2}$$

где W_{cpi} – средние многолетние суточные величины наполнения водохранилищ естественного стока, W_{mini} – многолетние минимальные суточные величины наполнения.

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

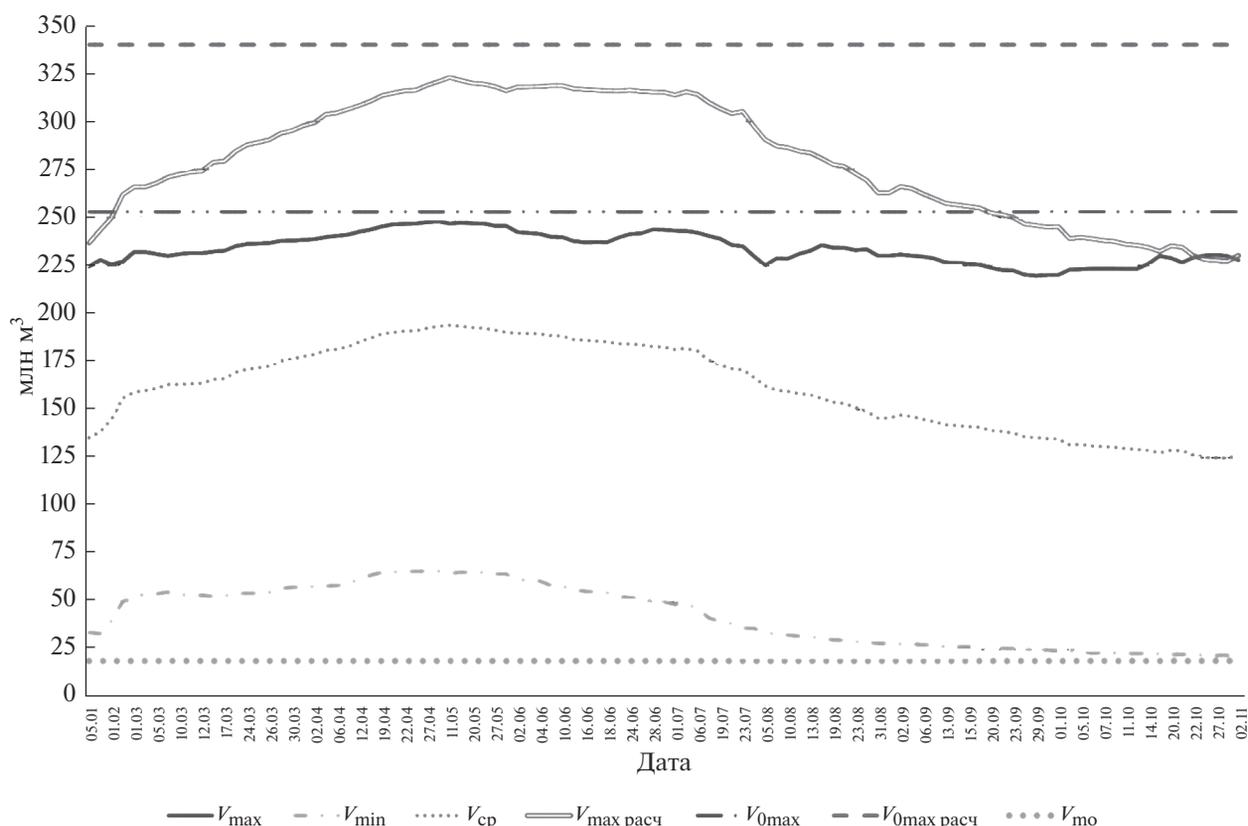


Рис. 5. Временной ход расчетного суммарного суточного максимального объема наполнения водохранилищ естественного стока по результатам анализа многолетнего среднего и минимального объемов наполнения. V_{max} — многолетний максимальный объем наполнения; V_{min} — многолетний минимальный объем наполнения; V_{cp} — 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 $W_{cp\ i}$ составляет 192–194 млн м³ в конце апреля и начале мая. В эти периоды $W_{min\ i} = 65–66$ млн м³. 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 м³. 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 м³. Среднее расчетное значение максимального объема водохранилищ естественного стока — $W_{max\ i} = 340$ млн м³ — 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 м³, в том числе: Симферопольского с проектным полным объемом 36, Партизанского — 34.4 и Аянского — 3.9 млн м³. Фактический суммарный объем водохранилищ, обеспечивающих водоснабжение г. Симферополя, который можно использовать по их регламентам, составляет 66.5 млн м³. 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 м³) и фактическим суммарным проектным объемом водохранилищ (66.5 млн м³), обеспечивающих водоснабжение города без учета испарения и фильтрации, обуславливает зависимость водоснабжения города от циклических 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 м³. 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 м³, 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 м³.

На рис. 6 представлен временной 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 м³ 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 м³ построено в 1981 г. Из Загорского водохранилища вода насосами перекачивается в водохранилище Счастливенское-2 с возможной среднесуточной перекачкой воды до 55 тыс. м³. Счастливенский гидроузел состоит из трех источников: Ключевского водозабора, водохранилища Счастливое-1 объемом 27 тыс. м³ и водохранилища Счастливое-2 с полным объемом 11.8 и полезным — 11.54 млн м³. Вода из Ключевского водозабора самотеком идет в тоннель Счаст-

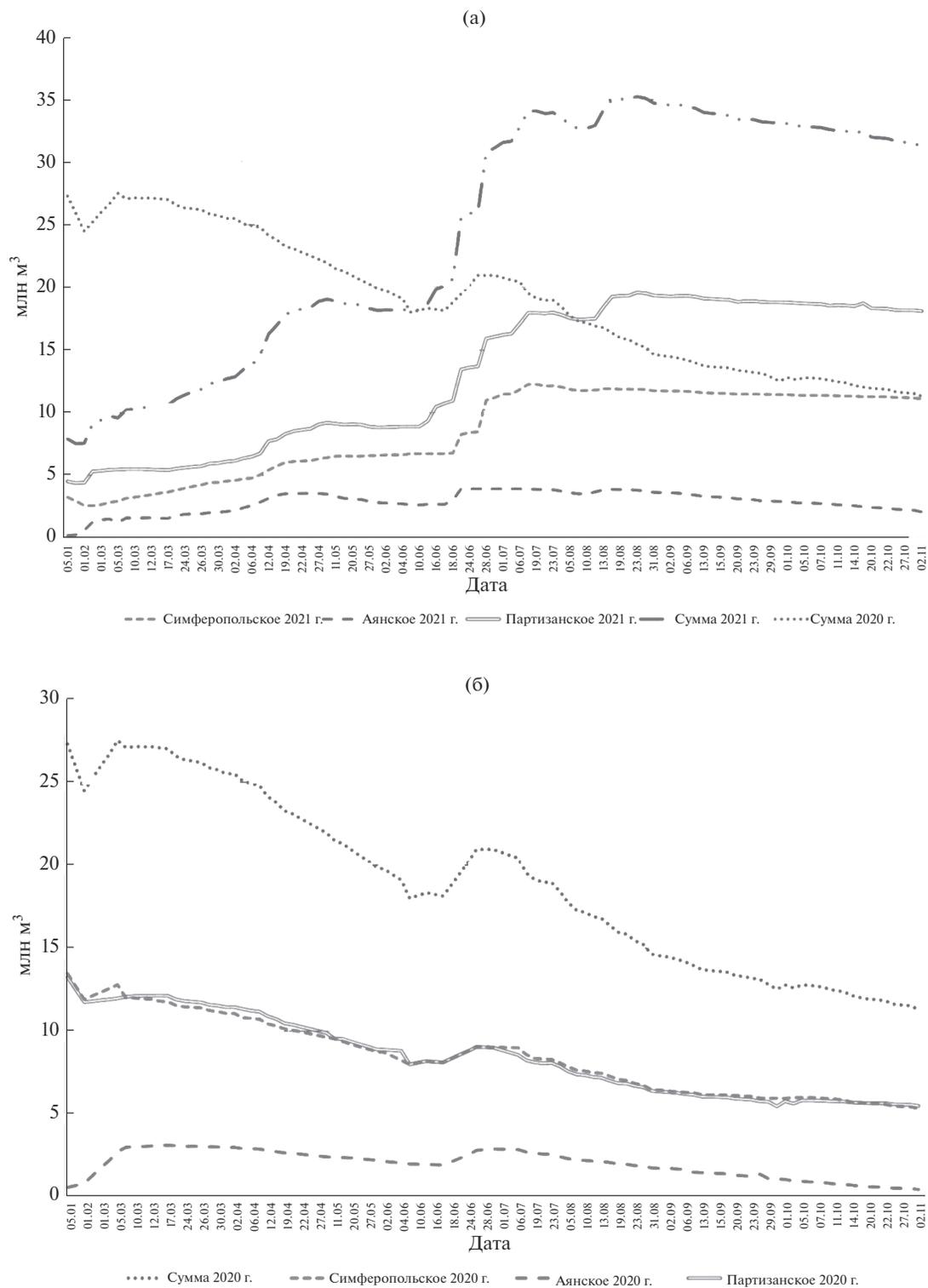


Рис. 6. Анализ наполнения водохранилищ — источников водоснабжения г. Симферополя: а — январь—октябрь 2021 г.; б — январь—октябрь 2020 г.

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 дли-

ной 7.25 км самотеком из водохранилища Счастливое-2.

Кроме этого, в систему водоснабжения ЮБК подается 5—9 млн м³ 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 – Ха-ста-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 Счастливого и таким образом накапливать в них воду. До сооружения в середине 1960-х гг. Счастливого гидроузла с гидротоннелем, соединяющим Северный и Южный порталы, местные источники были основным источником водоснабжения ЮБК.

На рис. 7 представлен временной 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 м³, 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. м³. 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 сбала-нсирования 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 м³/с, что соответствует 2 млн м³/сут, при этом среднемноголетний расход – 0.21 м³/с, что составляет 18.1 тыс. м³/сут, или 6.6 млн м³/год [5, 8, 11]. Аналогично река и водопад Учан-Су имеют наибольший расход 60 м³/с, что соответствует 5.2 млн м³/сут, а средний многолетний расход – 0.34 м³/с, что составляет 29.3 тыс. м³/сут, или 10.7 млн м³/год [13]. Это значит, что реки и водо-

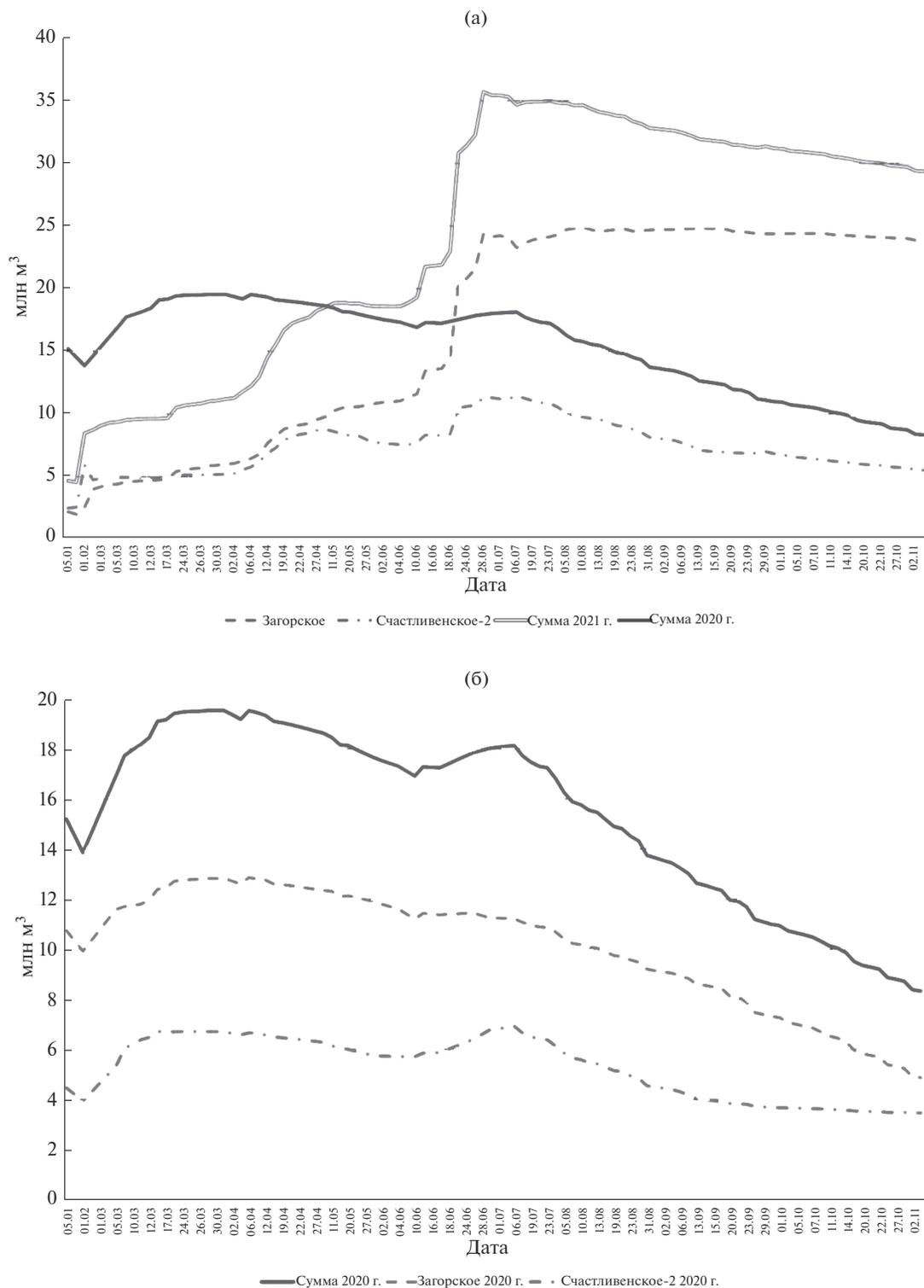


Рис. 7. Временной ход наполнения водохранилищ – источников водоснабжения ЮБК: а – январь–октябрь 2021 г., в том числе для сравнения – суммарный приток за 2020 г.; б – январь–октябрь 2020 г.

стоки, формирующиеся на южных склонах Крымских гор за несколько суток в периоды паводков, сбрасывают в море объемы воды, равные среднемуголетнему годовому стоку. Существу-

ющие поверхностные водозаборы из местных источников, формирующихся на южных склонах Крымских гор, имеют возможность подачи 50–55 тыс. м³ воды, а действующие резервуары чи-

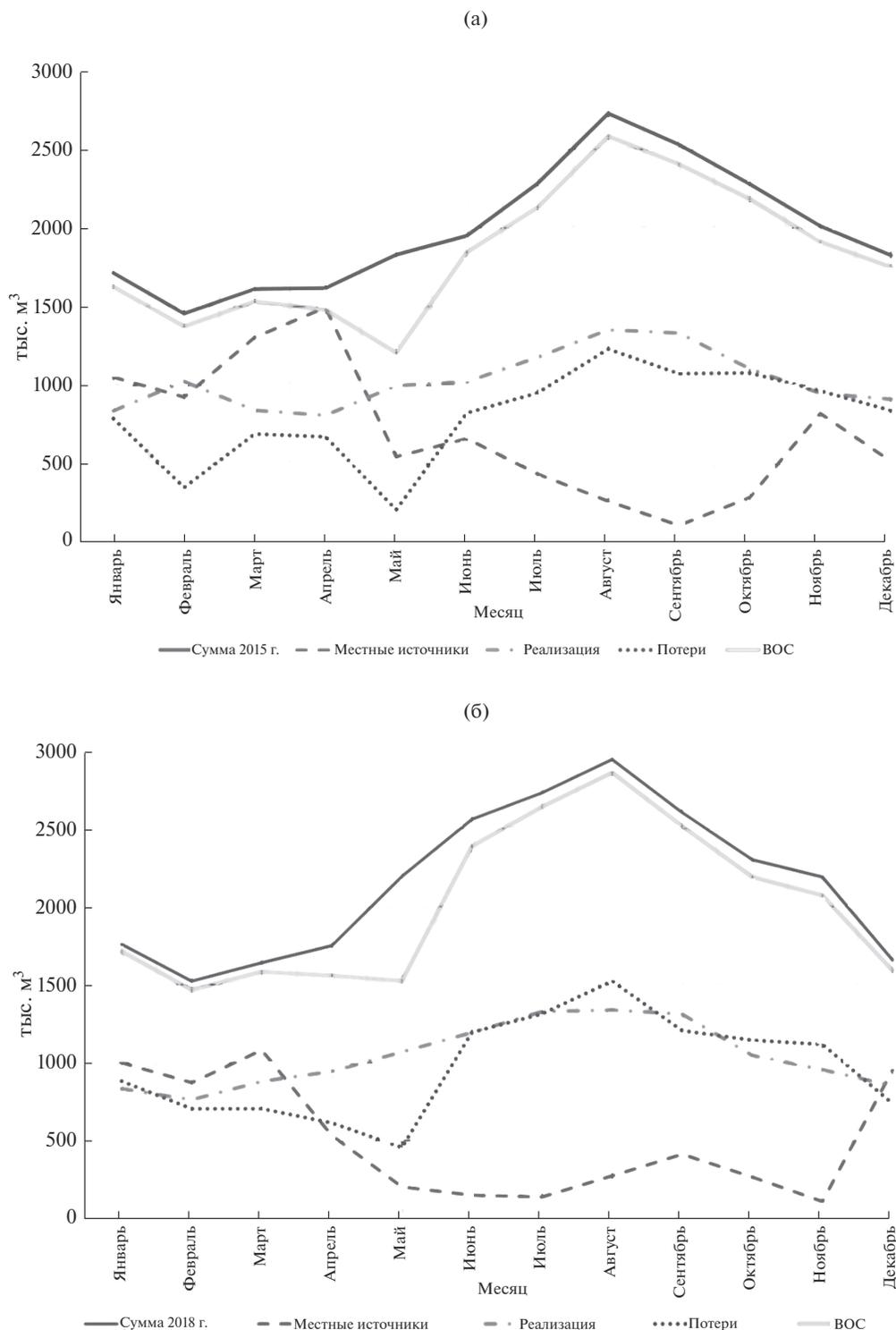


Рис. 8. Фактические ежемесячные данные Водоканала ЮБК: а – 2015 г.; б – 2018 г.

стой воды Водоканала ЮБК для системы водоснабжения могут аккумулировать до 100 тыс. м³ 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 м³. Забор из местных источников в 2015 г. составил 8.4 млн м³, что обеспечило 35% общего объема водопотребления ЮБК, а в 2016 г. забор воды составил 5 млн м³, что обеспечило 20% годового водозабора. Следовательно, применение и аккумуляция 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 суще-

ственно 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. м³ воды/ч, что соответствует 1.7 млн м³/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 удовлетво-

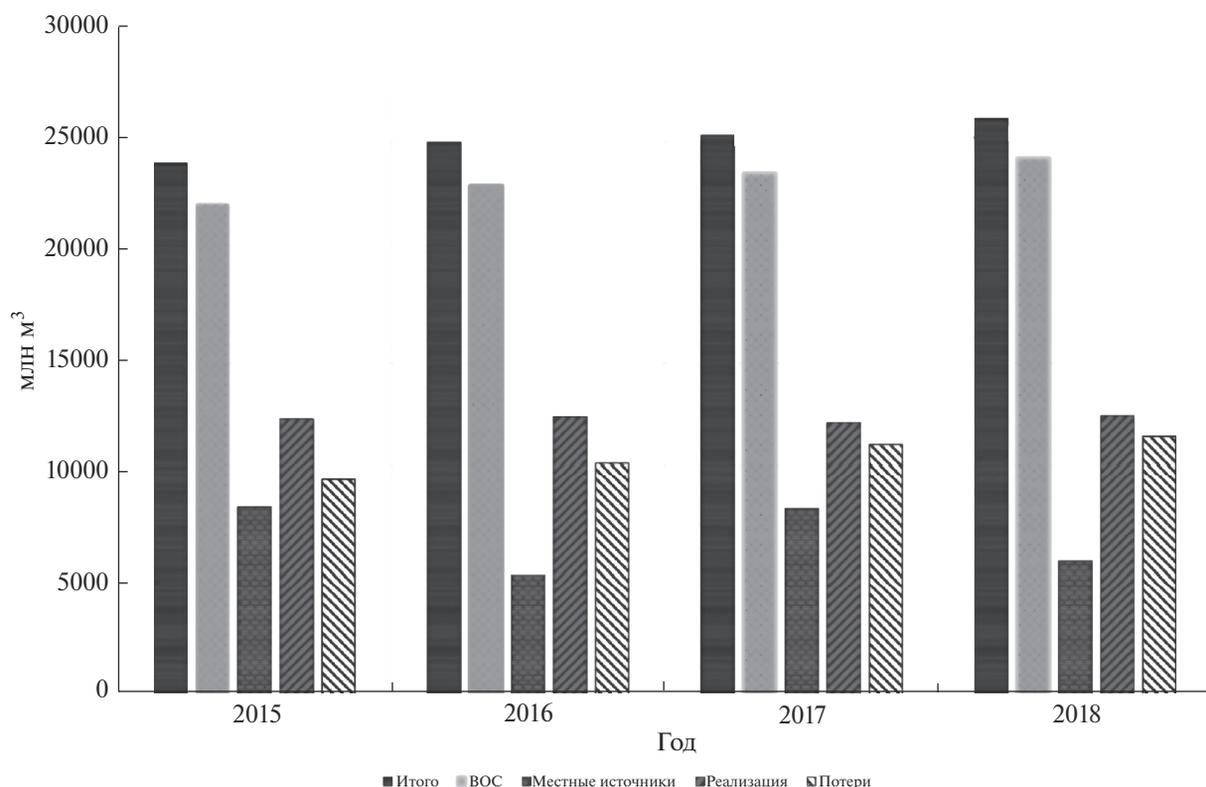


Рис. 9. Фактические годовые данные Водоканала ЮБК.

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 водозаэффективности.

Выполненный анализ данных по наполнению водохранилищ естественного стока Крыма за многолетний период показал, что их суммарный полный проектный объем занижен на 70 млн м³. 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 м³.

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 м³ 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., Барабощкина 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. Шумов 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>

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 556.06

**ОЦЕНКА СОБСТВЕННЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА¹****© 2022 г. А. Г. Косицкий^{a, b, *}, Е. М. Богуцкая^{a, b}, М. Г. Гречушникова^{a, b},
В. Ю. Григорьев^{a, b}, А. А. Сазонов^{a, b}, М. А. Харламов^{a, b}, Н. Л. Фролова^{a, b}**^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 19991 Россия^bИнститут водных проблем РАН,
Москва, 119333 Россия

*e-mail: alexhydro@mail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2022 г.

После доработки 21.02.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2022 г.

На основе данных о годовом стоке на 15 гидрологических постах, отражающих относительно естественные условия формирования стока, выявлены современные особенности его пространственно-временной изменчивости. Для девяти действующих из них проведен полный статистический анализ многолетних рядов наблюдений. Для некоторых рек характерно увеличение годового стока с 1991 г. Оценены зависимости средних многолетних расходов воды рек, находящихся в условно естественных условиях, от их порядков, определяемых методом А. Шайдеггера. Установлено, что по характеру зависимости крымские реки вписываются в общие закономерности данных соотношений, полученных для других рек России. В частности, средние многолетние расходы воды рек Крыма оказываются выше рассчитанных по нижней огибающей соотношения средних многолетних расходов воды и порядков разных рек России, что позволило с ее помощью получить наименьшее из возможных значений средних многолетних объемов годового стока рек Крыма и, соответственно, объемов возобновляемых водных ресурсов, равное 371 млн м³.

Ключевые слова: Крым, возобновляемые водные ресурсы, недостаток данных наблюдений, незарегулированные реки, естественный режим, однородность рядов, годовой сток, структура гидрографической сети, порядок реки.

DOI: 10.31857/S0321059622040113**ВВЕДЕНИЕ**

Крым – один из наиболее воднодефицитных районов РФ. Наряду с малым количеством собственных водных ресурсов сопутствующая проблема – асинхронность их внутригодового распределения с потребностями населения и хозяйства, поскольку значительная их часть формируется в зимний и весенний периоды, в то время как наибольшая необходимость в воде характерна для летнего сезона. После прекращения подачи воды по Северо-Крымскому каналу проблема нехватки воды в Крыму возникла наиболее остро. В связи с этим наиболее важной задачей становится определение количества собственных водных ре-

сурсов Крымского п-ова и оценка их достаточности для оптимального водопользования.

**ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ
ВОДНЫХ РЕСУРСОВ КРЫМА**

Первые сведения о реках и источниках Крыма известны в России с XVII в. В 1790 г. адъютантом Федором Черным была составлена генеральная карта Крыма. На карте была полностью показана гидрографическая сеть полуострова, включая водотоки Южного берега, балки Тарханкутского и Керченского полуостровов, а также озера и береговая линия прол. Сиваш. В первой половине XIX в. режим и условия питания водотоков оставались малоизученными. Спустя три года после сильной засухи (1833 г.) официально была признана малая водообеспеченность Крымского п-ова [20].

В 1860-х гг. начались экспедиционные исследования, которые были связаны с проблемами

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9). Статистический анализ проведен в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

обводнения отдельных районов полуострова и изучения местных водных источников. Условия питания рек горной части Крыма впервые рассмотрены Г.Д. Романовским в 1867 г. [20].

А.И. Воейков в работе [8], посвященной классификации рек, пишет об особенностях распределения стока крымских рек в течение года.

Начало гидрометрических работ на реках Крымского п-ова относится к 1887 г. В 1896 г. на р. Черной в устье с целью организации водоснабжения г. Севастополя изучались условия питания колодцев и источников, определялся их дебит и температура воды.

В начале XX в. Комиссией по оздоровлению территории Южного побережья детально изучаются реки южного склона Крымских гор. В 1906 г. на Ай-Петринской яйле сооружались каменные стены для удержания снега с целью последующего повышения водности рек горной части по проекту профессора И.К. Сикорского [20]. Таким образом, к началу XX в. в Крыму были обследованы многие реки горной части полуострова, выявлена гидрологическая особенность карста и возможность артезианского водоснабжения северной части Крыма.

С 1911 г. особое внимание стало уделяться гидрологическим изысканиям. Была создана “Особая Крымская изыскательная партия”, по инициативе которой были установлены первые пять гидрологических постов на реках Барбала, Яузлар, Учан-Су. В 1912 г. по инициативе руководителя отдела земельных улучшений Н.В. Рухлова начались первые гидрометрические наблюдения на реках Крыма.

В 1913 г. инженером путей сообщения Г.В. Федоровым была организована партия Крымских водных изысканий, проводившая исследования на реках до 1924 г. В это время в верховьях р. Салгир проводились гидрологические исследования для последующего сооружения водохранилища и плотины. С 1913 по 1918 г. на реках Крыма устанавливается 80 гидрологических постов. Гидрологические наблюдения в связи с частыми паводками и вынужденным переносом гидропостов велись нерегулярно. Тем не менее в 1916 г. расходы воды определялись уже на 120 реках Крыма [20].

По результатам наблюдений на постах с 1913 по 1919 г. Д.И. Кочерин изучил распределение годового стока р. Салгир и рассчитал изменение коэффициентов стока в зависимости от площади водосбора. В 1922 г. вышла его работа, в которой описаны результаты экспедиционных исследований рек Салгир и Биюк-Карасу [33].

Д.И. Кочерин отмечает, что для рек южных широт, в частности Крыма, влияние площади водосбора не должно быть значительным. Более того, он показывает, что для рек Крыма имеет место

существенное падение слоя стока с уменьшением площади водосбора [17].

В 1931 г. начала проводиться работа по составлению Водного кадастра СССР, в который вошли данные по стоку рек Крыма. В работе Б.Д. Зайкова и С.Ю. Белинкова [11] появились данные по стоку рек Крыма, которые включали в себя рассчитанные среднемноголетние расходы и модули стока по 82 гидропостам. В [11] авторы отмечают, что для большей части полуострова характерны модули стока < 0.5 л/(с км²). Наибольших величин модули стока достигают в наиболее высокой части Крыма (20–25 л/(с км²)), где количество атмосферных осадков увеличивается. Б.Д. Зайковым и С.Ю. Белинковым составлена карта среднего многолетнего стока Европейской части СССР. Стоит отметить, что для Крыма карта дает схематическое распределение стока, что связано с резким изменением по территории полуострова условий, влияющих на сток [11]. В 1940 г. вышел “Водный Кадастр СССР”, в котором приведены данные об уровнях воды, а также среднемесячные и характерные расходы воды рек Крыма. В работе [11] описан крымский тип водного режима рек, характеризующийся ярко выраженным летним или летне-осенним меженным периодом, в течение которого паводки случаются редко, а многие реки и вовсе пересыхают.

В 1947 г. в связи с подготовкой к строительству Симферопольского водохранилища П.М. Шликарем составлены в масштабе 1 : 500000 гидрологические карты среднего годового стока, сезонного стока, карты среднегодовой мутности и др. [20].

В 1962 г. К.П. Воскресенский публикует работу [9], в которой приводит значение среднего стока ≤ 0.5 л/(с км²) для рек степных районов и 6–10 л/(с км²) – для рек горной части Крыма. К.П. Воскресенский указывает, что в наиболее высокой части Крымских гор в бассейне р. Черной сток достигает величин 25 л/(с км²), а в верховьях небольших рек южного склона он может достигать до 56 л/(с км²). Таким образом, автор подтверждает данные по стоку рек Крыма, указанные ранее в работе [11].

В 1960-х гг. гидрологическая сеть Крымского п-ова состояла из 55 гидропостов. В издании 1966 г. [24] приведена карта среднего годового стока рек Крыма. Средняя многолетняя величина стока для всей территории составляет 1.04, для горной части – 10, а для равнинной (степной) – 0.1 л/(с км²) [24].

В 1984 г. вышла книга [23], в которой представлена карта среднемноголетнего годового стока рек СССР. Для рек равнинного степного Крыма он составляет 0.2–1.0 л/(с км²), для рек горных районов среднемноголетний годовой сток – 10–

15 л/(с км²) [23]. Эти значения оказываются меньше приведенных К.П. Воскресенским [9].

В 1990-е гг. сократилось число гидрологических постов. Расположены гидропосты по территории Крыма крайне неравномерно, после 1987 г. прекратилась публикация результатов гидрометрических наблюдений.

В атласе “Автономная Республика Крым” [5] представлена карта среднего многолетнего годового стока. Карта также подтверждает полученные ранее данные по стоку рек Крыма на большей равнинной части (≤ 0.5 л/(с км²)) и в горной части (15–20 л/(с км²)).

В XXI в. началось активное изучение влияния леса, карста, высоты и площади водосборов на распределение стока рек Крыма. В статье [4] на примере р. Абдалки выявлено значительное влияние разнообразных карстопроявлений на сток реки. Согласно приведенным расчетам водного баланса реки, 14% годовой суммы атмосферных осадков в виде подземного стока уходит на питание водоносных горизонтов равнинного Крыма. Е.Л. Мырза и В.А. Овчарук в [19] установили, что, с одной стороны, за счет влияния карста снижается максимальный сток рек, с другой – в верховьях мощных карстовых источников происходит мощный сброс, в результате которого минимальный сток повышается. При этом карст может быть причиной перераспределения водных запасов не только по территории одного водосборного бассейна, но и за его пределами.

К современным результатам гидрологических исследований рек Крыма следует отнести работы М.В. Болгова и А.В. Зайцевой, в которых проведено районирование рек Крыма по синхронности колебаний годового стока. Авторами выделено 8 районов с квазисинхронным колебанием стока. Для каждого из районов получены зависимости среднесезонных модулей речного стока от средней высоты водосбора [7]. Однако неясно, как авторы при оценке синхронности учли антропогенное воздействие на речной сток.

В 2014 г. проведена оценка водных ресурсов рек Крыма, согласно которой суммарное годовое количество возобновляемых водных ресурсов составило 0.83 км³, 93% которых приходилось на горную часть полуострова и лишь 7% на равнинную степную. Предполагается, что для обеспечения жизнедеятельности полуострова необходимо ~200 млн м³/год воды. Таким образом, для покрытия потребности требуется <25% собственных возобновляемых водных ресурсов Крыма [13].

В Докладе о состоянии окружающей среды в Республике Крым [10] приведены сведения о водопотреблении за последние годы и о его динамике. По официальным данным, суммарное водопотребление с 2010 по 2016 г. сократилось более

чем в пять раз: потребление на хозяйственно-питьевые нужды осталось примерно на том же уровне, а потребление на производственные нужды увеличилось в среднем в 1.5 раза. Существенное сокращение водопотребления произошло в сельском хозяйстве (в ~8 раз) и на орошение (в 50 раз).

Итоги многолетних исследований водных ресурсов Крыма опубликованы в монографии [29]. Согласно этим данным, к настоящему времени на реках Крыма построены 23 крупных водохранилища и 1045 прудов общим объемом 556 млн м³. Это примерно половина всего поверхностного и подземного годового стока Крыма. По оценке Гидрометслужбы Украины (2009 г.), общие собственные ресурсы речного стока Крыма составляют 910 млн м³, в том числе в горной части 85%, в равнинной степной части 15%.

Систематизацией данных по крымским водным объектам занималось Крымское бассейновое управление водных ресурсов, сотрудники которого в 2011 г. подготовили и опубликовали справочник [22]. В нем приведены данные по норме и изменчивости годового стока для 65-ти гидропостов, рассчитанные как по наблюдаемому ряду, так и по удлиненному ряду с помощью данных рек-аналогов.

В 1960-е гг. проблема водоснабжения Крыма была решена строительством Северо-Крымского канала, по которому вода поступала на территорию полуострова из р. Днепр. В 2014 г. подача воды по каналу была прекращена, и задача обеспечения водными ресурсами стала одной из актуальных региональных проблем.

Рассматривая суммарные водные ресурсы Крыма, авторы работы [14] указывают, что до 2014 г. вклад днепровских вод в общий баланс водных ресурсов Крыма через Северо-Крымского канал составлял в среднем 2.29 км³ (78.3%), естественного речного стока, который аккумулировался в прудах и водохранилищах, – 0.31 км³ (11.8%), забор подземных вод – 0.22 км³ (7.8%), морских – 0.07 км³ (2.1%). Вклад воды через Северо-Крымского канал от года к году варьировал от 70.3 до 85.6%, естественного стока – от 3.1 до 20.7%, подземных вод – от 6.6 до 9.1%, морских – от 0.7 до 3.9%. Основным потребителем пресной воды на полуострове всегда было сельское хозяйство: ~70% пресных вод тратилось на орошение земель (от 65 до 83%), на сельскохозяйственное водоснабжение ~8, на хозяйственно-бытовые нужды – 13, на производство – 6.5% [29].

Оценка местных водных ресурсов Крыма чрезвычайно актуальна в научном и практическом отношении. В настоящее время в ежегодных изданиях Государственного водного кадастра приводятся оценки местных водных ресурсов Крыма начиная с 2014 г. [25]. При средних многолетних значениях водных ресурсов Крыма, оцениваемых

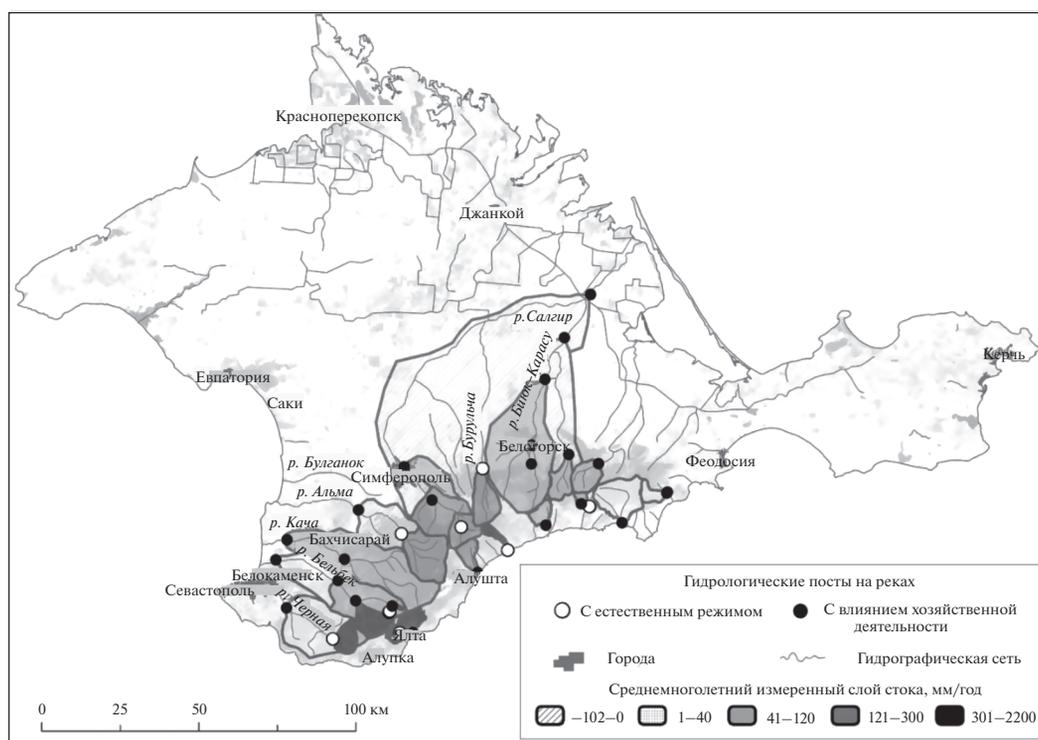


Рис. 1. Среднеголетний слой стока, определенный по частным водосборам, для действующих постов, мм/год.

в $1.0 \text{ км}^3/\text{год}$, наибольшее значение – 2.2 (1945 г.), наименьшее – 0.5 (1972 г.) км^3 . За последние годы эта величина колебалась от 0.8 (в 2014 г.) до $1.2 \text{ км}^3/\text{год}$ (в 2016 г.). С учетом антропогенного воздействия и сложности формирования стока крымских рек требуется уточнение имеющихся оценок.

Цель проведенного исследования – пространственная оценка естественного гарантированного стока крымских рек (являющегося мерой возобновляемых водных ресурсов) в условиях недостатка данных наблюдений. Сток крымских рек искажен вследствие антропогенного влияния, поэтому задача данного исследования – выявление природных составляющих речного стока и основных закономерностей их пространственного распределения. Важнейшей задачей остается оценка и его временной изменчивости для рек, незначительно искаженных хозяйственной деятельностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе использованы данные наблюдений на гидрологических постах крымских рек. В разное время на территории полуострова действовало более 100 гидрологических постов. Продолжительность наблюдений на разных постах колеблется от 1 до 85 лет.

В настоящее время в Крыму действуют 33 поста (рис. 1). Большинство из них не в полной мере отражает естественные условия формирования стока, поскольку они находятся на реках, испытывающих сильное антропогенное воздействие. Зарегулированность рек многочисленными прудами и водохранилищами серьезно искажает их режим и характеристики стока. Лишь девять действующих гидрологических постов отражают квазиестественные условия, поскольку расположены в верховьях рек, где выше по течению отсутствуют искусственные водоемы и населенные пункты. Однако они расположены очень компактно, в основном у подножия Крымских гор, где и в основном формируется сток крымских рек. Обширные степные равнины северо-западной части Крыма и Керченского п-ова почти не изучены в гидрологическом отношении.

Другая особенность использования гидрологических данных связана с тем, что данные постов, отражающие естественный режим, расположены исключительно на малых реках, условия формирования стока которых зачастую имеют азональный характер и отражают местные локальные условия водосборов. В связи с этим их данные очень сложно использовать для построения пространственных гидрологических обобщений.

Даже отсутствие водоемов, крупных населенных пунктов, а также сведений о водопользовании в бассейне реки выше створа гидрологиче-

Таблица 1. Выбранные гидрологические посты на реках с условно естественными условиями формирования стока (вдхр – водохранилище)

№	Река	Пост	Период наблюдений, годы
1	Альма	Крымгосзаповедник	1917–1987
2	Альма	Выше вдхр Партизанского	1966, действует
3	Кача	п. Загорское	1955–1975
4	Стиля	с. Лесниковое	1914–1984
5	Манаготра	с. Счастливое	1914–1987
6	Биюк-Узенбаш	То же	1914, действует
7	Кучук-Узенбаш	с. Многоречье	1965, действует
8	Приток р. Кучук-Узенбаш	То же	1965, действует
9	Черная	с. Родниковское	1916, действует
10	Учан-Су	пгт Чехово	1946, действует
11	Улу-Узень	с. Солнечногорское	1914, действует
12	Ай-Серез	с. Междуречье	1971–1978
13	Кизил-Коба	с. Краснопешерное	1913–1987
14	Ангара	с. Перевальное	1913, действует
15	Бурульча	Межгорье	1930, действует

ского поста не дает полной гарантии отсутствия антропогенного влияния на сток. Так, в Крыму имеет место многочисленный систематический несанкционированный забор воды из водных объектов. Забор и сброс сточных вод в крымские реки часто проводится частным образом. Все это также усложняет выявление пространственных закономерностей формирования речного стока.

Данные по всем действующим постам за 1950–2019 гг. (рис. 1) использованы для оценки пространственной изменчивости стока рек. Для анализа и оценки слоя стока использовались частные водосборы. За частный водосбор принимается площадь водосбора между створом замыкающего данный участок гидрологического поста и вышележащими створами. Величина стока R с частного водосбора рассчитывается как изменение стока на этом участке (рис. 1).

На основе анализа полученных данных, сопоставления расположения гидрологических постов на реках с наличием на них гидротехнических сооружений, водохранилищ и на основе результатов собственных экспедиционных исследований выбрано 15 гидрологических постов (табл. 1), данные которых отражают более или менее естественные условия формирования стока. Девять из них действующие, а шесть закрыты в настоящее время, но данные по ним могут быть восстановлены с учетом синхронности колебаний стока. По каждому из выбранных постов использованы ряды средних годовых, а в отдельных случаях и среднемесячных расходов воды. Восстановление данных закрытых гидрологических постов за период отсутствия наблюдений проводилось в соответствии с действующими норма-

тивными документами [21]. С учетом небольшой продолжительности наблюдений на некоторых постах (~10 лет) для построения связи расходов воды по закрытым постам с расходами по действующим использовали не только средние годовые, но и средние месячные расходы воды. Большинство коэффициентов парной корреляции >0.7 даже для наиболее удаленных друг от друга рек (например, рек Альма и Черная).

Предварительный статистический анализ многолетних колебаний годового и сезонного стока был проведен для девяти действующих постов с условно ненарушенными условиями формирования стока. Главным критерием ненарушенности стока было отсутствие крупных по водоносности водотока прудов и водохранилищ в бассейне. Данные этих постов покрывают основной диапазон изменчивости условий формирования стока в горной и предгорной части Крыма с модулями стока от 1.3 л/(с км²) на р. Ай-Серез – с. Междуречье (у северо-восточной оконечности Главной гряды Крымских гор) до 73 л/(с км²) на притоке р. Кучук-Узенбаш – с. Многоречье (берущего начало на склонах Ялтинской яйлы).

Для проверки однородности рядов годового стока по величине среднего и для выявления года перелома использовался тест Петита (“Pettitt’s test”) [38], показавший значимое нарушение однородности. Исходя из общности циркуляции над территорией Крыма, а также из результатов расчета по Петит-тесту, анализа разностных интегральных кривых годового стока в качестве года возможного нарушения стационарности был выбран 1991 г. Пример временно́го ряда и его разностной интегральной кривой приведен на рис. 2.

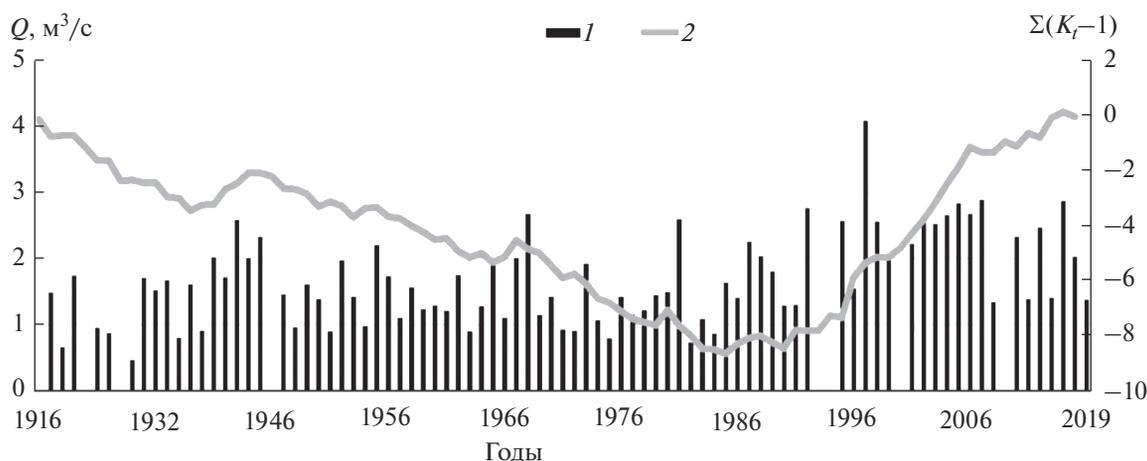


Рис. 2. Годовые расходы воды Q р. Черная – с. Родниковское в 1916–2019 гг. (1) и разностная интегральная кривая годового стока (2). Пунктир – линия линейного тренда.

В соответствии с выбранным годом перелома проведен анализ однородности рядов по величине среднего и среднеквадратического отклонения σ . Для проверки однородности по среднему использовался параметрический t -критерий Стьюдента [34] и непараметрический U -критерий Манна–Уитни [37]. При этом критерий Стьюдента предполагает сравнение средних, а критерий Манна–Уитни – сумм рангов. Для оценки однородности рядов по величине σ рассмотрены два параметрических теста: F -критерий Фишера, наиболее широко используемый в отечественной гидрологии, и критерий Левене [36]. Критерий Левене имеет мощность выше, чем критерий Фишера, для распределений с “тяжелыми хвостами” [18].

Оценка значимости тренда за 1950–2019 гг. проводилась с помощью непараметрического теста Манна–Кендалла [35], а расчет параметров линейной регрессии – с помощью метода наименьших квадратов.

В работе использованы зависимости средних многолетних расходов воды от порядков рек N , определяемых методом А. Шайдеггера: $N = 1 + \log_2 P$ (P – количество водотоков первого порядка в бассейне реки) [1]. Этот метод, по сути, – наиболее усовершенствованное для гидрологических целей определение порядка реки от верхних к нижним звеньям речных систем, развивающее идеи Р. Хортона, А. Страллера, В.П. Философова, Н. А. Ржаницына и др. [26, 30, 32]. Под рекой первого порядка понимается водоток, не имеющий притоков. Слияние двух рек первого порядка приводит к возникновению реки второго порядка, слияние двух рек второго порядка – рождает реку третьего порядка и т.д. В общем случае, если сливаются реки разных порядков, то ниже по течению сохраняется наибольший из порядков сли-

вающихся рек, а при слиянии однопорядковых водотоков – порядок увеличивается на единицу. В отличие от своих предшественников, А. Шайдеггер при определении N учитывает практически все элементы речной сети, что позволяет достичь большего соответствия между порядком реки и другими гидрологическими характеристиками. Кроме того, порядок реки, определенный таким способом, – не обязательно целое число, что приводит к более плавному его изменению по длине главной реки.

Поскольку порядок реки напрямую зависит от количества водотоков первого порядка в бассейне реки, то безусловно его значение при прочих равных условиях отражает размер реки: чем больше площадь водосбора F , тем больше значение N . Однако при одной и той же площади водосбора порядок реки может принимать разные значения. Так, например, в засушливых районах со слабым развитием речной сети N меньше, чем для территорий с сильно расчлененным рельефом и, соответственно, развитой речной сетью (при $F = \text{const}$). Очевидно, что при равенстве F порядок реки будет сильно зависеть от густоты речной сети d . Чем больше d , тем больше водотоков первого порядка на заданной площади и, соответственно, выше порядок главной реки. Проведенные ранее исследования на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова показали, что порядок реки – относительно универсальная функция F и d , которая выражается уравнением [2, 3]:

$$N = \log_2 F + 2 \log_2 d.$$

Следовательно, значение N дает представление, с одной стороны, о размере реки (мерой которого обычно служит площадь водосбора), а с другой –

Таблица 2. Среднегодовой расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$) до Q_1 и после Q_2 1991 г., его изменение ΔQ , значимость этих изменений по критерию Стьюдента t и Манна–Уитни U . Среднеквадратическое отклонение расходов воды за первый σ_1 и второй σ_2 периоды и его изменение $\Delta\sigma$, значимость этого изменения по критерию Фишера F , Левене lv . Величина линейного тренда $Q - tr$ и его значимость по критерию Манна–Кендалла (значимые при 5%-м уровне величины выделены жирным шрифтом; вдхр – водохранилище)

Река–пост	р. Кучук-Узенбаш– с. Многогорье	Приток р. Кучук-Узенбаш– с. Многогорье	р. Улу-Узень– с. Солнечногорское	р. Ай-Серез– с. Междуречье	р. Черная– с. Родниковское	р. Альма – выше вдхр Партизанского	р. Учан-Су– пгт Чехово	р. Ангара– с. Перевальное	р. Бурульча– Междурье
$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$	0.20	0.21	0.38	0.01	1.42	1.05	0.28	0.28	0.43
$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$	0.19	0.23	0.39	0.02	2.21	1.46	0.28	0.29	0.60
$\Delta Q, \%$	–3.2	13.3	0.9	61.0	55.8	38.9	1.5	6.3	37.3
t	0.761	0.143	0.936	0.125	0.000	0.030	0.922	0.584	0.011
U	0.950	0.092	0.984	0.176	0.000	0.028	0.326	0.627	0.015
σ_1	0.07	0.06	0.15	0.02	0.50	0.54	0.12	0.11	0.21
σ_2	0.07	0.07	0.18	0.02	0.79	0.72	0.22	0.13	0.29
$\Delta\sigma, \%$	0	21	20	38	59	34	93	12	38
f	0.484	0.175	0.149	0.057	0.006	0.083	0.000	0.272	0.036
lv	0.808	0.553	0.549	0.201	0.131	0.344	0.432	0.881	0.144
$tr \%/10 \text{ лет}$	–0.6	1.9	3.3	8.2	10.1	10.1	–1.3	2.2	7.7
mk	0.957	0.394	0.250	0.394	0.001	0.053	0.240	0.526	0.024

об условиях концентрации стока (мера которой – густота речной сети).

Многие гидрологические характеристики зависят от порядка реки, что обычно выражается экспоненциальным уравнением. Если брать характеристики стока, то наиболее тесные зависимости от порядка реки прослеживаются обычно для средних многолетних расходов воды [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученной информации показывает существенную пространственную неоднородность стока рек Крыма, вызванную как природными, так и антропогенными факторами. Наибольший слой стока показали малые реки в южной части Крыма, начинающиеся на Ялтинской и Ай-Пелинской яйлах. Среди относительно крупных рек этого района выделяется р. Черная со слоем годового стока 1150 мм. Отсюда по направлению на СВ слой стока рек Главного хребта постепенно падает до 36 мм (руч. Кизилташский), за исключением р. Улу-Узень ($R = 369$ мм). Наименьшая величина – $R = 102$ мм – выявлена в бас-

сейне р. Альмы ниже Партизанского водохранилища. В пределах степного Крыма в бассейне Салгира происходит существенная потеря стока за счет как природных, так и антропогенных факторов.

Результаты статистического анализа для незарегулированных рек по девяти постам приведены в табл. 2.

Практически для всех рек в последние 30 лет характерно увеличение стока от 0–2 до 40–60% (Ай-Серез, Черная, Альма), однако при 5%-м уровне значимости как по критерию Стьюдента, так и по критерию Манна–Уитни лишь три реки – Черная, Альма и Бурульча – показывают нарушение однородности рядов годового стока. Рост величины σ годового стока составил от нуля на р. Кучук-Узенбаш до 93% на р. Учан-Су. Разные критерии дают разный рост σ . Критерий Фишера допускает нарушение однородности на трех постах, но лишь на одном из них – р. Учан-Су – это не сопровождается значимым ростом Q , что допускает проверку с помощью критерия Фишера. Кроме того, при большей изменчивости и асимметрии рассматриваемых рядов вероятно, что ис-

Таблица 3. Характеристики рек в створах гидрологических постов

№	Река	Пост	Расстояние от устья	F , км ²	L , км	$H_{\text{ср}}$, м	N	Q_0 , м ³ /с	y , мм
1	Альма	Крымгосзаповедник	70	39.7	13	810	3.6	0.72	570
2	Альма	Выше вдхр Партизанского	55	184	28	640	6.0	1.21	210
3	Кача	п. Загорское	51	110	21	800	5.6	1.04	300
4	р. Стиля	с. Лесниково	7	8.8	7.6	870	3.3	0.60	2150
5	Манаготра	с. Счастливое	2.5	5.06	3.7	660	0.5	0.037	230
6	Биюк Узенбаш	То же	1.9	6.55	4	980	1.0	0.23	1110
7	Кучук-Узенбаш	с. Многооречье	2.8	10	5.5	980	0.5	0.20	630
8	Приток р. Кучук-Узенбаш	То же	0.16	2.46	0.1	530	1.0	0.21	2700
9	Черная	с. Родниковская	32.6	47.6	12	730	3.8	1.75	1160
10	Учан-Су	пгт Чехово	2.9	16.8	4.9	680	3.0	0.26	490
11	Улу-Узень	с. Солнечногорское	1	32.5	12	530	3.8	0.39	380
12	Ай-Серез	с. Междуречье	2.1	12.8	9.4	480	2.1	0.016	39
13	Кизил-Коба	с. Краснопешерное	3	16.8	2	690	2.6	0.23	430
14	Ангара	с. Перевальное	5.8	38.3	8.8	880	4.0	0.28	230
15	Бурульча	Межгорье	58	85	21	520	4.0	0.50	185

пользование критерия Левене более оправданно. Критерий Левене не выявил значимого изменения σ ни на одном из постов.

Реки, показавшие рост среднего по критериям Стьюдента и Манна–Уитни, также показали наличие монотонного тренда по критерию Манна–Кендалла (за 1950–2019 гг.). Скорость роста для них составляет от 7.7% на р. Бурульче до 10.1% на реках Черной и Альме. Меньшее изменение стока, возможно, связано с большей долей подземного питания рек, однако данная гипотеза требует еще подтверждения.

В качестве единого периода осреднения выбран 1963–2019 гг. (за исключением 2011–2013 гг., за который отсутствуют данные в органах Росгидромета), который включает в себя как маловодную (до 1991 г.), так и многоводную (после 1991 г.) фазы. На всех выбранных гидрологических постах с помощью восстановленных данных получены средние многолетние расходы воды Q_0 , приведенные к периоду 1963–2019 гг. Полученные результаты представлены в табл. 3. Здесь же приведены основные физико-географические и гидрографические характеристики рек: гидрографическая длина реки L , площадь F и средняя высота $H_{\text{ср}}$ водосбора, а также порядок реки N , определенный методом А. Шайдеггера.

Средние многолетние стоки выбранных рек меняются в диапазоне от 39 до 2700 мм. Наибольшие значения стока характерны для рек с небольшими водосборами, насыщенными родниками. Эти родники зачастую собирают сток со значительно большей территории, чем поверхностные водосборы рек, что приводит к несовпадению площади поверхностных и подземных водосборов в пользу последних и, как следствие, к увеличению слоев стока, посчитанных формальным делением объемов годового стока на площади поверхностных водосборов.

К сожалению, этих сведений недостаточно для полноценных пространственных обобщений, вследствие чего приходится использовать альтернативные методы оценок. Один из таких методов – индикаторная гидрология, основанная на построении зависимостей характеристик стока от гидрографических характеристик (характеризующих размер реки и развитость речной сети), в том числе и от порядков рек.

Соотношение средних многолетних расходов воды и порядков исследуемых крымских рек представлено на рис. 3. По характеру зависимости реки объединяются в три группы. Большинство рек относится к первой группе. Здесь при одинаковых значениях N средние многолетние расходы воды получаются меньше, чем у рек других групп. Наибольшие значения Q при одинако-

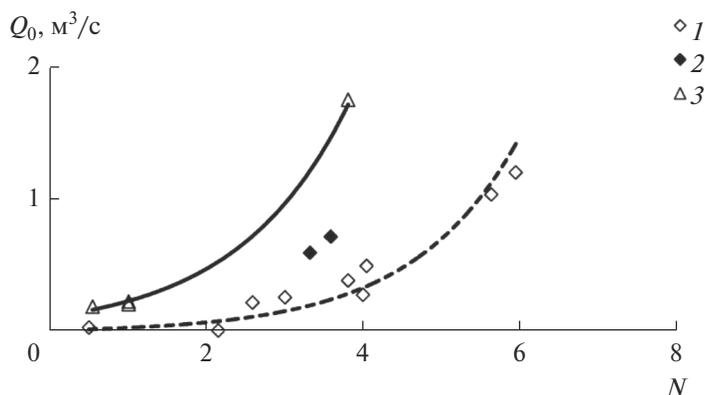


Рис. 3. Соотношение средних многолетних расходов воды Q_0 и порядков рек N Крыма: 1 – Альма (выше водохранилища Партизанского), Кача, Манаготра, Учан-Су, Улу-Узень, Ай-Серез, Кизил-Коба, Ангара, Бурульча; 2 – Альма (Крымгосзаповедник) и Стиля; 3 – Черная и верховья р. Бельбека.

вом N характерны для рек третьей группы. В нее попадают четыре реки: Черная и в верховьях р. Бельбек – Биюк-Узенбаш, Кучук-Узенбаш и его приток в с. Многоречье. Исток р. Биюк-Узенбаш – многоводный карстовый родник. Кучук-Узенбаш и его безымянный приток представляют собой мощные горные потоки с большими уклонами и скоростями течения. Исток рек – источник Кучук-Узенбашский, который находится в непосредственной близости от гидрологического поста в с. Многоречье. Истоком р. Черной считается Скельский источник, находящийся в 200 м выше гидрологического поста в с. Родниковском. Именно этот источник дает основную часть стока реки. Поэтому неудивительно, что при прочих равных условиях расходы воды в этих реках больше, чем в остальных.

Две точки на рис. 3 занимают промежуточное положение: они соответствуют рекам Альма (в створе Крымгосзаповедник) и Стиля. Эти реки условно отнесены ко второй группе. Они обе протекают в предгорной части; следовательно, их водосборы географически также расположены между водосборами рек первой и третьей групп.

С точки зрения природных процессов, средний многолетний сток – предиктор, а порядок реки – функция. Величина стока определяется прежде всего соотношением между осадками и испарением, а также площадью водосбора реки. Речная сеть, которая формируется тысячелетиями, конечно, зависит и от водоносности территории. Чем больше сток, формируемый на определенной площади, тем больше при прочих равных условиях сформируется на ней водотоков и, соответственно, будет больше порядок реки в замыкающем створе. Конечно, водоносность – не единственный фактор формирования речной сети, поэтому зависимость $Q(N)$ (или $N(Q)$) не может иметь универсального характера. В данном случае

гидрологические посты, относящиеся к третьей группе, расположены очень близко к подземным водоисточникам, что не позволяет сформироваться здесь большому количеству водотоков. В данном случае фактором, ограничивающим развитие речной сети, выступает не водоносность, а площадь, на которой данный сток формируется.

Тем не менее водоносность территории – хоть и не единственный фактор формирования речной сети, но, безусловно, также выступает для нее ограничивающим условием, поскольку при недостатке воды речная сеть не сформируется. В связи с этим наиболее актуальным представляется рассмотрение нижней огибающей зависимости $Q(N)$. Именно она показывает, какая наименьшая величина среднего многолетнего расхода воды требуется для того, чтобы сформировалась река порядка N . С точки зрения оценки водных ресурсов нижняя огибающая в данной зависимости дает представление о гарантированной величине среднего многолетнего расхода воды, следовательно – и возобновляемых водных ресурсов, которые должны формироваться при заданном развитии речной сети.

Проведенные ранее исследования по другим рекам России [15] показали, что зависимости между Q_0 и N , построенные для разных рек, хоть и отличаются друг от друга, но при этом имеют общую нижнюю огибающую (рис. 4).

Нижняя огибающая зависимости $Q(N)$ для рек России может быть описана уравнением

$$Q_0 = 0.00204e^{0.84N}. \quad (1)$$

Из рис. 4 видно, что средние многолетние расходы воды рек Крыма также оказываются выше определяемых уравнением (1), причем для всех трех групп рек. Следовательно, уравнение (3) можно использовать для оценки гарантирован-

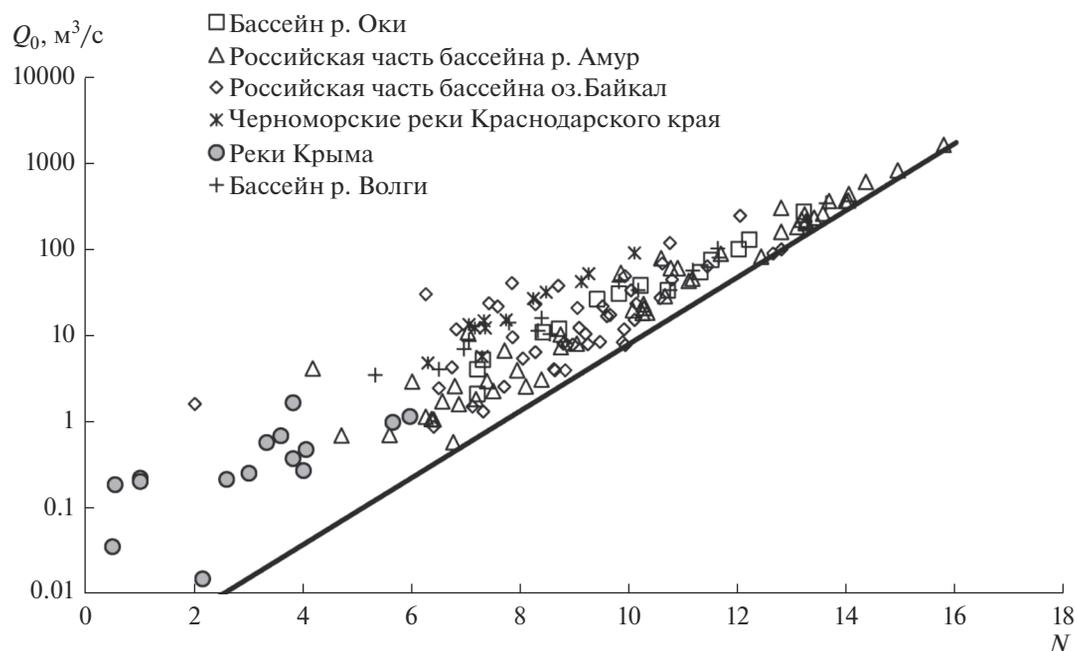


Рис. 4. Соотношение средних многолетних расходов воды Q_0 и порядков N разных рек России с добавлением данных по рекам Крыма.

ного количества естественных водных ресурсов, формируемых в пределах Крымского п-ова. Для их оценки использованы значения N всех Крымских рек, впадающих в Черное или Азовское моря и по уравнению (1) для каждой из них рассчитаны средний многолетний расход воды и объем стока (табл. 4).

Суммарная величина природной составляющей среднего многолетнего объема стока всех рек Крыма получилось 371 млн m^3 /год. Следует подчеркнуть, что фактический суммарный объем стока должен быть больше данной величины, поскольку она получена с использованием нижней огибающей зависимости $Q(N)$, в то время как реальные расходы воды большинства рек, особенно в предгорной части Крымского п-ова, многократно превышают данные значения. Однако для более точной оценки местных водных ресурсов Крыма требуется серьезное сгущение сети гидрологического мониторинга.

Сопоставление полученного гарантированного объема естественных местных возобновляемых водных ресурсов Крымского п-ова с данными о водопользовании [10] свидетельствует о том, что при грамотном распределении воды, минимизации ее потерь при транспортировке и исключении из сельского хозяйства выращивания водоемких культур, воды должно хватить для покрытия всех потребностей населения и хозяйства.

ВЫВОДЫ

Существующей сети гидрологических постов недостаточно для определения закономерностей формирования стока Крымских рек, поскольку из 33 действующих гидрологических постов лишь 9 отражают условно естественные факторы формирования стока. Сток, измеряемый на остальных гидрологических постах, включает значительную антропогенную составляющую. При этом условно-естественные посты расположены на малых реках вблизи Крымских гор, в то время как подавляющая часть площади Крыма остается неизученной в гидрологическом отношении.

Статистический анализ многолетних рядов расходов воды по девяти условно-естественным гидрологическим постам показал, что в последние 30 лет произошло увеличение водности некоторых крымских рек. Статистически значимое увеличение стока выявлено на трех из девяти гидрологических постов.

Зависимости средних многолетних расходов воды от порядков крымских рек, протекающих в естественных условиях, имеют такой же характер, как и для рек, протекающих в других регионах России. Они имеют экспоненциальный характер. Наибольшие расходы воды (при $N = \text{const}$) соответствуют створам рек, расположенным вблизи крупных подземных водоисточников. Установлено, что средние многолетние расходы воды рек Крыма всегда выше полученных по нижней огибающей зависимости $Q(N)$, полученной для раз-

Таблица 4. Расчет гарантированной естественной составляющей среднего многолетнего стока Крымских рек

Название реки	Куда впадает	Длина, км	Площадь бассейна, км ²	Порядок реки	Средний многолетний расход воды, м ³ /с	Средний годовой объем стока, млн м ³
Чатырлык	Каркинитский залив, Черное море	106	2250	5.3	0.18	5.6
Самарчик	То же	42	528	5.4	0.19	5.9
Без названия	Черное море, у с. Морсоке	5.4	6.4	2.0	0.01	0.3
То же	Черное море, у с. Окуневка	5.6	13	3.3	0.03	1.0
Западный Булганак	Каламитский залив, Черное море	49	180	4.3	0.08	2.4
Альма	То же	79	635	7.4	1.05	33.0
Кача	Черное море	64	573	7.2	0.83	26.2
Бельбек	То же	55	505	7.0	0.69	21.9
Черная	»	35	427	6.7	0.56	17.7
Абарка	»	3.6	4.2	1.0	0.005	0.15
Хастабаш	»	3.7	1.6	7.1	0.005	0.15
Загмата	»	6.6	5.6	1.0	0.005	0.15
Учан-Су	Черное море, г. Ялта	7	28.9	3.0	0.025	0.80
Дерекойка	То же	9.6	51	4.3	0.076	2.4
Авунда	Черное море	7.6	24	2.6	0.018	0.56
Путамиш	То же	7.6	14.5	2.6	0.018	0.56
Узень	»	7.8	20.8	4.0	0.058	1.8
Ла-Илья	»	4.1	23	3.3	0.033	1.0
Улу-Узень	»	12	75.7	4.9	0.12	3.9
Джемерджи	»	13	53.4	5.1	0.15	4.6
Семидворье	»	7	10.8	4.7	0.10	3.3
Алака	»	8	19.8	3.6	0.041	1.3
Куру-Узень	»	9	14.4	3.6	0.041	1.3
Улу-Узень	»	12	33.5	4.0	0.058	1.8
руч. Орта-Узень	»	11	26	3.3	0.033	1.0
Андус	»	10	52	3.8	0.050	1.6
б. Канака	»	2.6	19	4.3	0.076	2.4
Уснут	»	11	75.7	6.2	0.38	12.1
Узень	»	7.5	18.4	4.2	0.067	2.1
Шелен	»	10	42	3.3	0.033	1.0
Ворон	»	16	52	3.3	0.033	1.0
Кутлак	»	9	28.2	3.0	0.025	0.80
Таракташ	»	22	161	4.8	0.11	3.6
б. Бугасская	»	10	28.3	5.1	0.15	4.6
Безлы-Давры	»	8	22.3	3.3	0.033	1.0
Отуз	»	4.44	77	4.0	0.058	1.8
б. Янтык	»	10	50	4.3	0.076	2.4
Без названия	Черное море, в 1.5 км севернее с. Бубновка	8.4	18.5	3.8	0.050	1.6
Байбуга	Черное море	20	111	4.8	0.11	3.6
Без названия	Черное море, у с. Берегового	7	9	1.0	0.005	0.15
б. Песчаная	Черное море	12	37.6	3.6	0.041	1.3

Таблица 4. Окончание

Название реки	Куда впадает	Длина, км	Площадь бассейна, км ²	Порядок реки	Средний многолетний расход воды, м ³ /с	Средний годовой объем стока, млн м ³
Без названия	Черное море, в 1 км южнее с. Южное	16	52.1	4.0	0.058	1.8
б. Наиманская	Черное море	9	13.5	3.8	0.050	1.6
Чит-Оба	То же	10	26.1	3.3	0.033	1.0
Мелек-Чесме	Керченский пролив	16	133	6.1	0.348	11.0
Без названия	Керченский пролив, у г. Керчь	7	22.4	4.5	0.086	2.7
То же	Азовское море, в 5 км северо-восточнее с. Красная поляна	5.1	10.8	3.8	0.050	1.6
(б. Каралар)	Азовское море	11	21.2	3.8	0.050	1.6
Без названия	Азовское море, в 4 км северо-восточнее с. Золотого	5.8	17.6	3.6	0.041	1.3
То же	Азовское море, в 0.6 км севернее с. Ново-Отрадного	18	165	5.0	0.13	4.3
То же	Теряется в степи у с. Нижне-Заморского	7.4	11.5	1.0	0.005	0.15
(Зеленый Яр)	Азовское море, в 1.5 км северо-восточнее с. Песочного	14	482	3.3	0.033	1.0
(б. Али-Бай)	Азовское море у с. Набережного	40	182	5.5	0.21	6.6
Без названия	Арабатский залив у с. Каенского	12	47.5	1.0	0.005	0.15
руч. Сухой	зал. Сиваш	14	34.3	4.0	0.058	1.8
Чорох-Су	То же	33	204	5.2	0.16	4.9
Субаш	зал. Сиваш, в 2.5 км северо- восточнее с. Красновка	36	276	4.8	0.11	3.6
Мокрый Индол	зал. Сиваш (Солончаки)*	49	324	5.2	0.16	4.9
Восточный Булганак	То же	44	485	5.3	0.18	5.6
Без названия	зал. Сиваш (Солончаки), в 1.8 км юго-восточнее с. Алексеевка	24	113	1.0	0.005	0.15
Суджилка	зал. Сиваш (Солончаки)	31	102	1.0	0.005	0.15
Салгир	зал. Сиваш	204	3750	9.1	4.22	133.2
Карасу	То же	18	—	2.0	0.011	0.34
Гвардейская	зал. Сиваш у с. Славянского	7.9	122	3.0	0.025	0.80
Зеленая	зал. Сиваш, в 1 км севернее с. Нижние Острожки	5.7	169	1.0	0.005	0.15
Стальная	зал. Сиваш	6.9	134	1.0	0.005	0.15
Победная	То же	18	366	1.0	0.005	0.15
Мирновка	»	15	270	2.0	0.011	0.34
Без названия	зал. Сиваш у с. Завет-Ленинский	10	166	1.0	0.005	0.15
Сумма						371

ных рек России, что позволяет использовать ее для оценки гарантированной естественной составляющей среднего многолетнего стока рек Крыма.

С использованием нижней огибающей зависимости $Q(N)$, построенной для рек, протекающих в разных регионах России, оценена гарантированная естественная составляющая суммарного объема годового стока всех рек Крыма, впадающих в Черное и Азовское моря. Она отражает гарантированный средний объем ежегодно возобновляемых водных ресурсов Крыма, равный 371 млн м³. При этом их фактическая величина должна быть выше, поскольку реальные величины средних многолетних расходов воды большинства крымских рек значительно больше рассчитанных по нижней огибающей зависимости $Q(N)$, что подтверждается более ранними оценками возобновляемых водных ресурсов Крыма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Косицкий А.Г.* Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, общество, окружающая среда. Т. VI. Динамика и взаимодействие атмосферы и гидросферы. М.: Городец, 2004. С. 443–459.
2. *Алексеевский Н.И., Косицкий А.Г., Носань В.В., Христофоров А.В.* Подобие рек и их систем // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 531–544.
3. *Алексеевский Н.И., Косицкий А.Г., Христофоров А.В.* Фрактальные свойства речных систем и их использование в гидрологических расчетах // Вестн. Томского гос. ун-та. 2013. № 371. С. 167–170.
4. *Амеличев Г.Н., Олиферов А.Н., Новикова Ф.Н.* Гидрологические особенности р. Абдалки (Симферополь) в области питания артезианского бассейна Равнинного Крыма // Уч. зап. Крымского федерального ун-та. География. Геология. 2017. Т. 3 (69). № 1. С. 160–175.
5. Атлас: Автономная Республика Крым / Под ред. *Н.В. Багрова, Л.Г. Руденко.* Симферополь: Ин-т географии НАН Украины, 2003. 78 с.
6. *Богуцкая Е.М., Косицкий А.Г., Айбулатов Д.Н., Гречушников М.Г.* Средний многолетний сток рек юго-западной части Крымского полуострова // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 37–51.
7. *Болгов М.В., Зайцева А.В.* Оценка местного стока Республики Крым // Сб. тр. конф. “Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения”. М.: Лик, 2017. С. 116–120.
8. *Воейков А.И.* Климаты земного шара, в особенности России. СПб.: Картографическое заведение А. Ильина, 1884. 672 с.
9. *Воскресенский К.П.* Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеоздат, 1962. 552 с.
10. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории республики Крым в 2016 году. Ижевск: Принт-2, 2017, 300 с.
11. *Зайков Б.Д.* Средний многолетний сток и его распределение в году на территории СССР // Тр. НИУ ГМС. Сер. IV. Вып. 24. Л.: Гидрометеоздат, 1946.
12. *Зайков Б.Д., Белинков С.Ю.* Средний многолетний сток рек СССР. Л.: Гидрометгиздат, 1937. 78 с.
13. *Каюкова Е.П., Барабошкина Т.А., Косинова И.И.* Ресурсный потенциал пресных вод Крыма // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер. Геология. 2014. № 4. С. 104–109.
14. *Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г.* Водные ресурсы Крыма // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2016. № 1. С. 25–32.
15. *Косицкий А.Г., Гармаев Е.Ж.* Индикационные свойства рек Российской части бассейна оз. Байкал // Материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием “Современные проблемы географии и геологии”. Т. 1. Томск: ТГУ, 2017. С. 375–377.
16. *Кочерин Д.И.* Вопросы инженерной гидрологии. Л.: Энергет. изд-во, 1932. 208 с.
17. *Кочерин Д.И.* Колебания стока по площади в горном бассейне южного климата // Вод. транспорт. 1924. № 6. С. 639–643.
18. *Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Горбунова А.А.* О применении и мощности критериев проверки однородности дисперсий. Ч. I // Измерительная техника. 2010. Ч. I. № 3. С. 10–16.
19. *Мырза Е.Л., Овчарук В.А.* Анализ условий формирования паводков холодного периода на реках Крымских гор // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. Вып 1. С. 740–745.
20. *Олиферов А.Н., Тимченко З.В.* Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с.
21. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. М.: Госстрой России, 2003. 58 с.
22. Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов: справочник / Под ред. *А.А. Лисовского.* Симферополь: Крымучпедгиз, 2011. 242 с.
23. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 448 с.
24. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 344 с.
25. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегод. изд. СПб.: Росгидромет, 2014–2019.
26. *Ржаницын Н.А.* Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеоздат, 1960. 240 с.
27. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий // Под ред. *Е.А. Позаченюк.* Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 611 с.
28. *Тимченко З.В.* Среднемноголетние расходы реки Салгир и его притоков Зуя, Биюк-Карасу, Кучук-

- Карасу // Учен. зап. ТНУ. Сер. География. 2004. Т. 17 (56). № 4. С. 71–76.
29. Устойчивый Крым: Водные ресурсы / Под ред. В.С. Тарасенко. Симферополь: Таврида, 2003. 413 с.
30. *Философов В.П.* О значении порядков долин и водораздельных линий при геолого-географических исследованиях // *Вопр. морфометрии*. Вып. 2. Саратов: Изд-во СГУ, 1967. С. 4–6.
31. *Хмара Я.А.* Минеральные ресурсы Крыма и прилегающей акватории Черного и Азовского морей // *Вопросы развития Крыма*. Симферополь: Таврия-Плюс, 2001. 81 с.
32. *Хортон Р.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: Иностран. лит., 1948. 158 с.
33. *Шамов Г.И.* Д.И. Кочерин – основоположник учения о речном стоке. Л.: Гидрометеиздат, 1950. 36 с.
34. *Fundamentals of statistical hydrology* / Ed. *M. Naghettini*. Cham: Springer, 2017. p. 660.
35. *Kendall M.G.* Rank Correlation Methods. London: Charles Griffin, 1975.
36. *Levene H.* Robust tests for equality of variances // *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*. Stanford: Stanford Univ. Press, 1960. P. 278–292.
37. *Mann H.B., Whitney D.R.* On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other // *The Annals of Math. Statistics*. 1947. V. 18. № 1. P. 50–60.
38. *Pettitt A.N.* A non-parametric approach to the change point problem // *Appl. Statist.* 1979. V. 28. P. 126–135.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 551.44

**ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЛОГИИ
КАРСТА КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА**© 2022 г. Б. А. Вахрушев^а, Г. Н. Амеличев^а, С. В. Токарев^{а, *}, Г. В. Самохин^а^аКрымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
Симферополь, 295007 Россия

*e-mail: tokcrimea@list.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 20.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Крымский п-ов, 84% территории которого сложено растворимыми породами, — регион широкого распространения и разнообразного проявления карста. Практически все подземные воды Крыма связаны с карстовыми водоносными горизонтами, которые характеризуются рядом гидрогеологических особенностей: высокие концентрация и скорости движения подземных вод, очаговый характер разгрузки, несовпадения подземных водосборов с поверхностными и другие. Раскрыты основные проблемы гидрогеологии карста Крымского п-ова, среди них — идентификация эволюционно-генетических типов карста, определение буферной функции эпикарстовой зоны, установление водосборных границ крупных карстовых источников, оценка объемов субмаринной разгрузки карстовых вод и их использование, обоснование зон санитарной защиты для карстовых водозборов, сложности численного гидрогеологического моделирования в условиях карста. Для их решения предложен комплекс работ, включающих систематические эксперименты по мультитрассированию карстовых вод, режимные наблюдения в областях питания и на контурах разгрузки карстовых водоносных систем. Обязательное условие правильной интерпретации полученных данных — использование современных спелеогенетических концепций.

Ключевые слова: карст, подземные воды, Крымский полуостров, трассирование, субмаринная разгрузка, уязвимость.

DOI: 10.31857/S0321059622040186

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стратегическая задача для обеспечения устойчивого развития Крымского региона — эффективное управление водными ресурсами и поиск новых источников водоснабжения. Карст — один из ведущих гидрогеологических процессов на Крымском п-ове. Новые теоретические подходы к проблеме картирования и типизации закарстованных территорий [3, 6, 10] позволили увеличить учетную площадь территорий развития карста в Крыму до 21.3 тыс. км² (84% площади полуострова). Наличие карстующихся пород на поверхности или в недрах той или иной территории приводит к существенному изменению ее гидрологических, гидрогеологических и инженерно-геологических свойств.

Карстовые массивы Главной гряды Крымских гор — область питания крупнейших природных источников (Карасу-Баши, Скельского, Аянско-го, Пании и др.) и всех крупных водохранилищ полуострова, используемых для питьевого водоснабжения (в частности, Чернореченского, Пар-

тизанского и др.). От ресурсов карстовых подземных вод, формирующихся в пределах Главной гряды, критически зависит водоснабжение городов Симферополя, Севастополя, Ялты, Бахчисарая, Белогорска, с недавнего времени — Керчи, Феодосии и Судака, а также питание артезианских водоносных горизонтов Предгорного и значительной части Равнинного Крыма. Кроме того, все поверхностные водотоки, берущие начало в Горном Крыму, относятся к малым рекам карстового питания.

Цель данной работы — освещение основных проблем карстовой гидрогеологии Крыма с предложением путей их решения. Для этого прежде всего необходимо выполнить анализ степени изученности карста Крыма. Выявление основных проблем гидрогеологии карста в данном регионе позволит наметить актуальные направления дальнейших гидрогеологических исследований и предложить подходы к эффективной охране и рациональному использованию ресурсов карстовых вод полуострова.

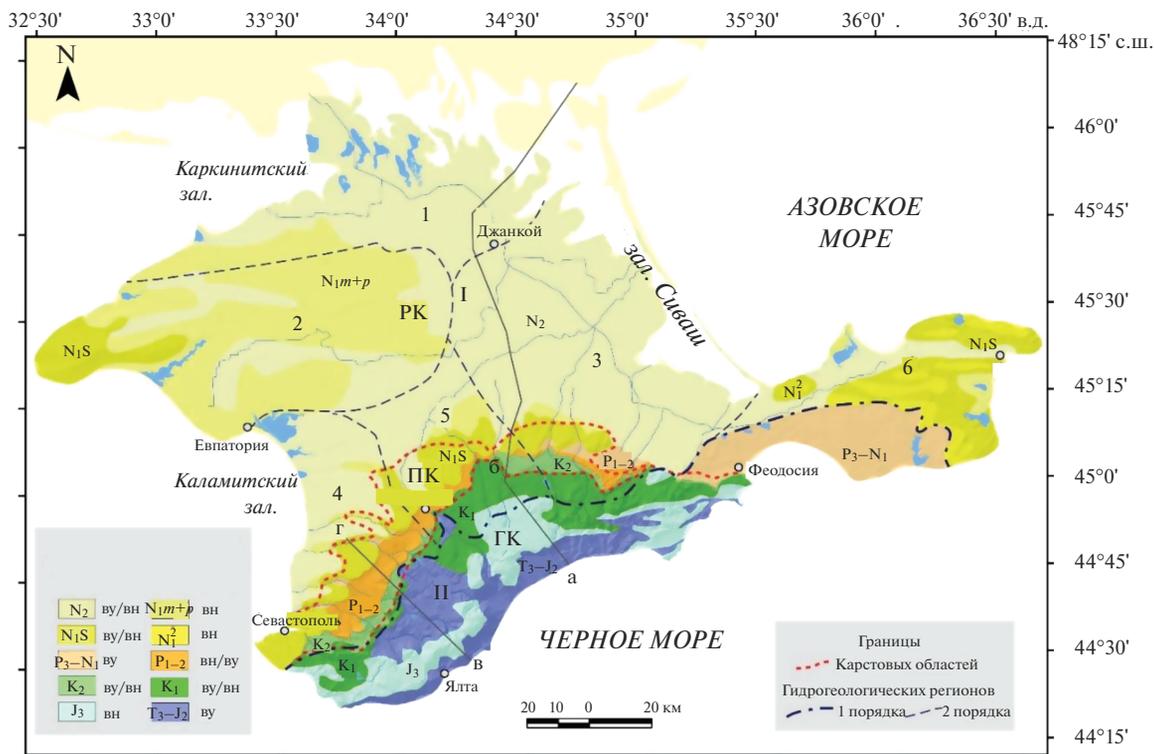


Рис. 1. Картолого-гидрогеологическая схема Крымского п-ова. Карстовые области (по Б.А. Вахрушеву [3], красные заглавные буквы): РК – Равнинно-Крымская, ПК – Предгорно-Крымская, ГК – Горно-Крымская. Гидрогеологические регионы 1-го порядка (по В.М. Шестопалову и др. [31], римские цифры): I – Причерноморский артезианский бассейн, II – Горно-Крымская гидрогеологическая область. Гидрогеологические регионы 2-го порядка в Равнинном Крыму (по Лушику и др. [24], арабские цифры): 1 – Северо-Сивашский, 2 – Новоселовский, 3 – Белогорский, 4 – Альминский, 5 – Симферопольский, 6 – Керченская область малых артезианских бассейнов. Линии а–б и в–г соответствуют гидрогеологическим разрезам на рис. 2.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В КРЫМУ

В таксономическом отношении Крым расположен в пределах Крымско-Кавказской и Восточно-Европейской карстовых стран, относится к карстовым провинциям Горного Крыма и Скифской плиты, в которых выделяются Горно-Крымская, Предгорно-Крымская и Равнинно-Крымская карстовые области (рис. 1).

Карстовые коллекторы подземных вод полуострова относятся к двум гидрогеологическим структурам 1-го порядка: гидрогеологической складчатой области Горного Крыма и Причерноморскому артезианскому бассейну [31]. В гидрогеологической области Горного Крыма (соответствует Горно-Крымской карстовой области) практически все ресурсы подземных вод содержатся в интенсивно закарстованных карбонатных породах верхнеюрского и, частично, нижне-мелового возраста. Механизм формирования вод здесь – исключительно автогенный, за счет выпадающих осадков в пределах открытых карстовых водосборов Главной гряды (инфильтрационный и инфлюационный типы питания), а также кон-

денсации в недрах карстовых массивов. Подавляющая часть ресурсов подземных вод Горного Крыма разгружается на поверхность через карстовые источники на склонах массивов, откуда берут начало крупнейшие реки полуострова. По оценкам И.Г. Глухова и Н.И. Дрозда, карстовое питание рек Главной гряды Крымских гор составляет >50% их общего стока [4].

В части Причерноморского артезианского бассейна, относящейся к Равнинному и Предгорному Крыму, наибольшее значение для питьевого водоснабжения имеют водоносные комплексы в трещиноватых и закарстованных известняках палеогенового и неогенового возраста (рис. 2). Их краевая область питания – Предгорный Крым, где восполнение ресурсов подземных вод происходит главным образом за счет поглощения руслового стока в местах пересечения реками предгорных гряд. Часть подземного стока восточных карстовых массивов Главной гряды (Долгоруковский, Карабийский, Агармышский) ввиду их плавного погружения на С под отложения более молодого возраста также напрямую участвует в питании артезианского бассейна. Таким образом,

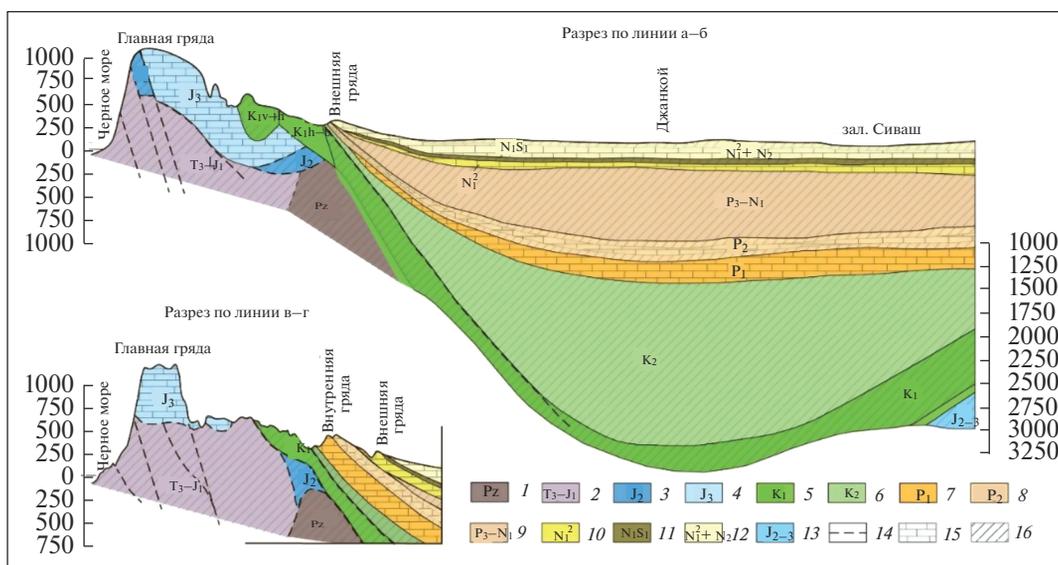


Рис. 2. Упрощенные гидрогеологические разрезы Крымских гор и Равнинного Крыма по линиям а-б и в-г (см. рис. 1): 1 – палеозойские метаморфизированные породы, 2 – флишевые отложения верхнего триаса – нижней юры (таврическая серия), 3 – песчано-глинистые и конгломератовидные породы средней юры, 4 – закарстованные известняки верхней юры с трещинно-карстовыми водами, 5 – песчаники, конгломераты и известняки нижнего мела, 6 – известняки и мергели верхнего мела, 7 – известняки и мергели палеоцена, 8 – известняки и мергели эоцена, 9 – глины олигоцен-нижнего миоцена (майкопская серия), 10 – пески и известняки среднего миоцена, 11 – глины нижнего и среднего сармата, 12 – известняки и пески верхнего миоцена и плиоцена с глинами сверху, 13 – песчано-глинистые отложения предположительно средней и верхней юры с трещинно-пластовыми водами, 14 – линии тектонических разрывов, 15 – водоносные комплексы и горизонты в закарстованных карбонатных породах, 16 – водоупорные пласты. Разрез по линии а-б построен по С.Л. Пугач [5] с переработкой авторов, разрез по линии в-г заимствован из [38] с переработкой авторов.

ресурсы основных эксплуатационных водоносных горизонтов равнинной части полуострова формируются при ведущем участии карстовых водосборов Горного Крыма. Однако объем этого питания достоверно не установлен в связи со сложностью гидрогеологических условий сочленения области питания Горного Крыма с артезианским бассейном Равнинного Крыма. Ранее оценка ресурсов и темпов водообмена в сармат-эотис-понтическом водоносном комплексе – основном эксплуатационном в Равнинном Крыму – проводилась на основе постоянно действующей гидрогеологической модели [33]. Согласно ее результатам, средний темп водообмена в комплексе равен 1800 лет, а наиболее интенсивный водообмен происходит в его юго-западной части (Альминский бассейн), где за счет латерального водопоступления с предгорий он составляет 150 лет.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАКАРСТОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В подходах к решению проблемы эффективно и устойчивого использования подземных и поверхностных источников водоснабжения региона до настоящего времени практически не учитывается карстовая природа подземных водоносных систем Горного, Предгорного и Равнинного

Крыма, а также гидрологические особенности рек карстового питания, составляющих подавляющее большинство поверхностных водотоков полуострова. Основные отличия карстовой и традиционной (некарстовой) гидрогеологии и гидрологии заключаются в следующем.

1. Для карстовых районов важнейший гидрологический фактор – несовпадение поверхностных и подземных водосборов, что требует применения особых методик для проведения водно-балансовых работ, особенно при гидротехническом строительстве, поиске и оценке ресурсов карстовых вод. В классической гидрогеологии и гидрологии основные показатели (слой стока, коэффициент стока, модуль стока и др.) прямо или косвенно учитывают в расчетах площадь поверхностно-топографического водосбора. При этой методике не учитываются возможные перетоки карстовых вод из соседних и более удаленных бассейнов или наоборот – из данного бассейна в смежные, что приводит к ошибкам в расчетных показателях. Например, построенное водохранилище или будет терять свой расчетный объем в связи с инфильтрацией воды в трещинно-карстовые пустоты, или при дополнительных водопритоках через карстовые источники необходимо будет производить технические попуски, формируя ниже плотины техногенные паводки, что неодно-

кратно происходит в крымских реалиях. Этот факт должен учитываться в первую очередь при создании моделей взаимодействия поверхностных и подземных вод для речных бассейнов, выбранных в качестве репрезентативных.

2. Для карстовых районов характерна высокая пространственная неоднородность и анизотропия емкостных и фильтрационных свойств водовмещающих пород и, как следствие, высокая степень концентрации и локализации подземного стока. Специфическая особенность карстовых коллекторов подземных вод – их многоуровневая пустотность и проницаемость (двухуровневая, иногда трехуровневая) порового, трещинного и канального типов. Расчеты группы зарубежных специалистов [43] позволяют сделать вывод о вкладе каждого из типов пустотности и проницаемости в подземный сток карстовых водоносных горизонтов (в безнапорных условиях). При том, что канальная пустотность обычно составляет всего от сотых долей до нескольких процентов общей пустотности, а поровая пустотность обычно >90%, водопроницаемость каналов на несколько порядков выше водопроницаемости других сред. Таким образом, именно канальная проницаемость обеспечивает почти весь (94–99%) подземный сток карстовых коллекторов [18].

3. Для карстовых районов характерен очаговый тип питания и разгрузки подземных вод. В многочисленных карстовых воронках и понорах замыкается поверхностная концентрация стока на горных плато. Такие малые реки, как Суботхан, Абдалка, Казанка, полностью поглощаются в недра на коротких участках русла, другие – теряют до 50% стока при пересечении карстовых участков. В Крыму источников со среднемноголетним расходом <0.2 л/с подавляющее большинство (>2000), но они суммарно дают всего 3 млн м³ в год, а 75 источников со среднемноголетним расходом >10 л/с дают 272 млн м³ в год. В целом, годовой сток всех источников >330 млн м³. Это показывает: при том, что в маловодный год поверхностный сток Крыма составляет 450 млн м³, а в многоводный достигает 950 млн м³ [10] – в засуху работает исключительно карстовая гидрогеология.

4. Для карстовых районов характерны очень высокие скорости движения подземных вод (и, соответственно, загрязнений при их попадании в водоносную систему). Скорости “добегания” индикатора от области питания до очагов разгрузки измеряются сотнями и тысячами метров в сутки, тогда как в обычных некарстовых коллекторах они в сотни и тысячи раз меньше. Результаты экспериментов по трассированию карстовых подземных вод в Горном Крыму показали, что средняя скорость их движения составляет 3350 м/сут [11]. Однако эту оценку, по мнению В.Н. Дублян-

ского [8], следует считать заниженной, поскольку регистрация времени прихода трассеров в пункты наблюдений в большинстве экспериментов была малодискретной (обычно раз в 4 дня), а эксперименты далеко не всегда проводились в периоды высокой обводненности. Вместе с тем новейший эксперимент, проведенный в 2019 г. на Долгоруковском массиве в условиях низкой водности, показал значительно меньшие скорости – всего 150–190 м/сут [28]. Примерно такие же скорости получены по результатам эксперимента на Долгоруковском массиве в 1964 г., проводившегося в осеннюю межень. Такие вариации скоростей движения карстовых вод указывают на кардинальные различия гидродинамических условий карстовых водообменных систем и целых массивов в зависимости от сезона и водности.

5. Для карстовых вод характерна крайне низкая способность к самоочищению и рассеиванию загрязняющих веществ. Это связано с рядом факторов: а) высокими скоростями движения карстовых вод; б) высокой канализованностью подземных водоотков; в) низкой адсорбционной способностью вмещающих пород; г) слабой элиминирующей способностью к загрязнителям разного класса. В связи с этим карстовые воды особенно чувствительны к загрязнителям разных типов и видов – загрязнители практически сразу, не видоизменяясь, поступают из области питания к области разгрузки или в пункты водозабора. Этот факт кардинально меняет методику оценки уязвимости карстовых вод к загрязнителям и вместе с этим – подходы к установлению границ водозащитных зон.

Таким образом, при гидрогеологических исследованиях карстовых районов критически важна адекватная характеристика канальной проницаемости, которая может быть достигнута с применением комплекса методов, обязательно включающего в себя анализ спелеологических данных, эксперименты по мультитрассированию карстовых вод, инвентаризацию очагов разгрузки и изучение их режима. Решающее значение для правильной интерпретации получаемой информации имеет применение современных спелеогенетических концепций [41].

СОВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ТИПОЛОГИЯ КАРСТА И ЕЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Важное значение в решении проблем карстовой гидрологии и гидрогеологии имеют современные представления об эволюционно-генетических типах карста и их гидрогеологическом функционировании. За несколько последних десятилетий в отечественной карстологии, развивающейся на стыке геолого-геоморфологических и гидролого-гидрогеологических наук, наблюдает-

ся смещение акцентов в изучении карста от первой группы ко второй. Среди новейших теоретических разработок в Крыму получила развитие генетическая концепция, согласно которой выделяется два основных типа карста – эпигенный и гипогенный [17, 19].

Эпигенный карст

Эпигенный карст формируется в приповерхностных горизонтах растворимых пород под влиянием свободных нисходящих поверхностных вод. Большинство его классических карстологических и спелеогенетических моделей, созданных в XX в., были построены для открытых гидрогеологических условий и основаны на представлениях о формировании каналовых систем в зоне полного насыщения за счет поверхностного питания с вышележащих или смежных площадей. Развитие фреатических каналов в толще растворимых пород сопровождается конкуренцией за расход и поверхностное питание, что обуславливает возрастание концентрированности последнего и тесную генетическую связь между спелеогенезом и поверхностным карстовым морфогенезом. При активном росте конкурентноспособных каналов питания становится недостаточным. Напор, а затем и свободная поверхность подземных вод постепенно снижаются до уровня базиса дренирования. Осушившиеся фреатические каналы какое-то время развиваются в зоне аэрации, а затем разрушаются и/или заполняются аккумулятивным материалом. Для эпигенного карста характерны высокие внутригодовые вариации расхода карстовых источников, относительно быстро откликающиеся на изменения синоптической ситуации на поверхности, преобладание изолированных водотоков в недрах.

Особую гидрогеологическую роль в эпигенном карсте играет так называемая эпикарстовая зона, пространственно коррелирующая с корой выветривания карстовых массивов. Эпикарстовая зона в сравнении с другими гидродинамическими зонами характеризуется более равномерной и высокой проницаемостью и значительными емкостными свойствами. Она получает главным образом инфильтрационное и конденсационное питание, имеет изменчивую мощность в пределах от нескольких до десятков метров и содержит безнапорные воды, обычно образующие подвешенный водоносный горизонт. Эпикарстовая зона имеет изменчивые запасы и играет регулируемую роль в режиме карстовых водообменных систем, задерживая и распределяя инфильтрационное питание с поверхности. В пределах эпикарстовой зоны перед входом в нижележащую зону аэрации происходит разделение площадной инфильтрации на две компоненты: быстрая фильтрация (воды, дренируемые из эпикарстового го-

ризонта крупными трещинами и нарушениями, обычно преобразованными в подэпикарстовые шахты) и медленная фильтрация (воды, дренируемые из эпикарстового горизонта мелкими трещинами). Морфогенетические процессы эпикарста – определяющие в образовании карстовых воронок на поверхности. Последние однозначно маркируют зоны быстрой фильтрации [15, 19].

Из этого следует важнейший вывод, который ранее не учитывался в гидрологии карста, – эпикарстовая зона выполняет важную буферную функцию по отношению к подземным водам vadозной и фреатической зон, препятствуя быстрому прохождению в них загрязнителей и растягивая во времени сработку динамических запасов карстовых вод. На это также указывают результаты изотопных исследований, проводимых на карстовых массивах Горного Крыма в последнее десятилетие [37, 38]. Так, выяснено, что при прохождении атмосферных осадков через карстовый массив приходящий от них изотопный сигнал ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$), имеющий “на входе” высокую вариацию ($\delta^2\text{H} = -117...-7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -16...-2\text{‰}$), существенно стабилизируется уже в эпикарстовой зоне ($\delta^2\text{H} = -95...-57\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -13...-8\text{‰}$). Крупные карстовые источники, дренирующие фреатическую зону, имеют практически неизменный изотопный состав вне зависимости от уровня водности ($\delta^2\text{H} = -72...-60\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -10.5...-9\text{‰}$).

Таким образом, атмосферные осадки, приходящие на поверхность карстового массива, внутри него проходят через два “выравнивающих” буфера: 1 – эпикарстовая зона с подвешенным водоносным горизонтом, 2 – фреатическая зона с основным горизонтом карстовых вод. В то же время проблемным вопросом остается определение емкостных параметров и водоудерживающей способности эпикарстовой зоны, без чего невозможно построение количественных геофильтрационных и геомиграционных моделей карстовых массивов.

Гипогенный карст

Понятие о гипогенном карсте сформировалось в научной литературе в течение двух последних десятилетий. Если ранее глубинные карстовые полости, находящиеся в гидрогеологически закрытых условиях, обычно трактовались как палеокарстовые формы, сформированные в эпигенных условиях былых эпох, то в последнее время в мировой карстологии происходит осознание их гипогенного происхождения и широко распространения гипогенного карста, определяемого как процесс образования макропустотности в гидрогеологически закрытых (полузакрытых) условиях с питанием от подстилающих толщ [17,

40, 42]. Гипогенный спелеогенез связан с режимами восходящей разгрузки региональных и промежуточных систем стока и с поперечным водообменом между горизонтами в слоистых напорных водоносных комплексах. Теория гипогенного спелеогенеза наиболее полно разработана для слоистых артезианских систем платформенного типа, однако ее ключевые положения также применимы к обстановкам восходящей разгрузки в тектонически активных зонах Горного, Предгорного и Равнинного Крыма, где каналовые системы гипогенного генезиса обеспечивают эффективную гидродинамическую связь между региональными водоносными горизонтами [22].

Анализ эволюции крымского карста позволяет выделить на территории полуострова три крупных региона, отличающихся друг от друга по гидрогеологическим и геолого-геоморфологическим условиям. Равнинный Крым представляет собой регион с преобладанием платформенных структур и бассейновой организацией водообменных комплексов. Здесь развит активный гипогенный спелеогенез, сопровождающийся проявлениями гидротермии, гидрохимическими, газовыми и изотопными аномалиями, но нет доступных полостных форм. Горный Крым — регион с давней историей карстообразования, который еще в мелпалеогеновое время пережил этап гипогенного развития, а в течение неоген-четвертичной эпохи его карстовые системы осуществили переход и стали функционировать на основе механизма эпигенного спелеогенеза. Предгорный Крым, занимая промежуточное положение, характеризуется переходными условиями, в которых гипогенные формы уже утратили свою гидрогеологическую активность, перешли в реликтовое состояние и относительно недавно были вскрыты или продолжают вскрываться на поверхности [1, 2].

ПРОБЛЕМА ЧИСЛЕННОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В КАРСТОВЫХ РАЙОНАХ И ИНДИКАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Указанные выше гидрогеологические особенности закарстованных коллекторов подземных вод сильно ограничивают применимость метода математического моделирования для решения практических задач. Как справедливо указывает А.Б. Климчук [18], основная проблема при этом — сложность адекватной количественной характеристики фильтрационных параметров в условиях их крайне высокой неоднородности и анизотропии. Достоверность математических моделей стока в условиях карста понижается с увеличением масштаба моделирования, т. е. с уменьшением размера моделируемой области. Поэтому боль-

шие шансы на успешную реализацию имеют региональные модели, либо модели, построенные в масштабе отдельных карстовых водоносных систем (карстовых бассейнов). Успешность таких моделей зависит главным образом от точности оценки каналовой проницаемости, что возможно с использованием метода индикаторных экспериментов — трассирования карстовых водоносных систем.

Трассирование подземных вод в карстовых районах позволяет достоверно решать следующие задачи:

- определять, что вода (и загрязнитель) движется от одной точки (очага питания, места потенциального или реального загрязнения) к другой точке (промежуточные водозаборные сооружения, крупные источники и водозаборы подземных вод);

- определять действительные скорости и расстояния движения подземных вод;

- трассировать распространение загрязненных вод от потенциального или актуального источника загрязнения, определять гидравлические связи мест локализации загрязнения с водоносными горизонтами, источниками и водозаборами подземных вод;

- определять зоны и места утечек из водохозяйственных и гидротехнических сооружений;

- определять границы областей питания и устанавливать обоснованные охранные зоны подземных источников и водозаборов;

- проводить поиск и оценку ресурсов карстовых подземных вод на основе установления гидравлических связей между областями питания, транзита и разгрузки;

- определять емкостные и фильтрационные параметры карстовых коллекторов подземных вод;

- проводить водно-балансовые работы в карстовых районах.

В 1960–1980-е гг. в карстовой области Горного Крыма было проведено более 30 индикаторных экспериментов [8, 11]. Еще несколько экспериментов было выполнено в 2000-е гг. [9, 28]. В качестве индикатора во всех случаях использовался флуоресцеин. Полученные результаты указывают на центробежный характер растекания карстовых подземных вод (рис. 3).

Следует отметить, что результаты проведенных ранее в Горном Крыму индикаторных опытов следует использовать с осторожностью. Проведенные эксперименты имели полуколичественный характер. Как известно, степень их надежности уменьшается с увеличением количества экспериментов, проведенных на одном массиве. Это объясняется задержкой красителя в изолированных подземных резервуарах, его оседанием на стенках карстовых полостей и трещин с последующим выносом в карстовые источники с павод-

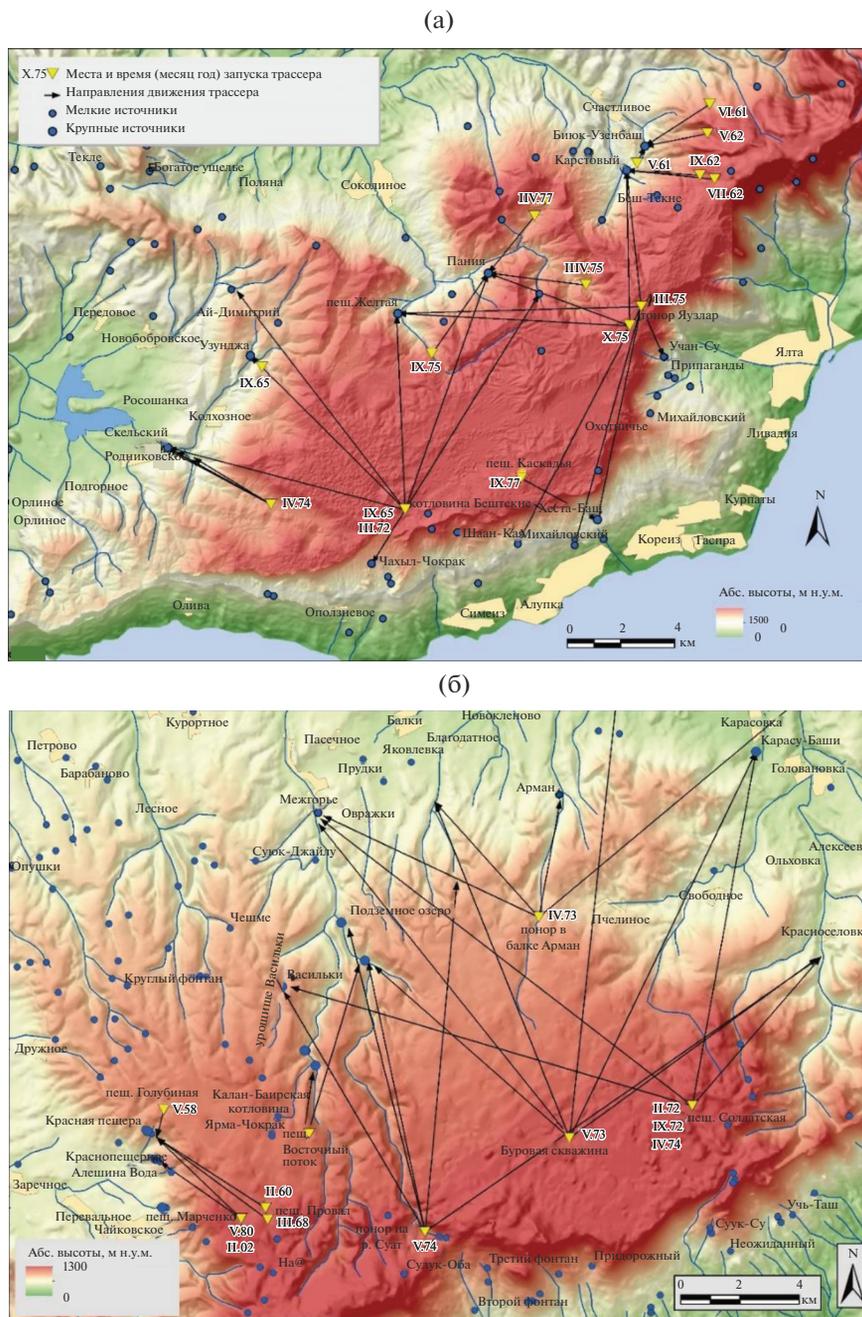


Рис. 3. Схемы индикаторных экспериментов на Ай-Петринском и Ялтинском массивах (а), на Долгоруковском и Карабийском массивах (б) (построены по данным [8, 9, 11, 28]).

ками в течение нескольких последующих лет, что делает проблематичным проведение последующих экспериментов с тем же красителем. Например, на Карабийском массиве в течение 1972–1974 гг. проводилось 6 экспериментов с одним и тем же красителем (рис. 3б). Похожая картина наблюдается на Ай-Петринском и Ялтинском массивах (рис. 3а). Результаты экспериментов, указывающие на центробежный характер растекания красителя внутри массивов, не соответствуют из-

вестным сведениям об изолированности карстовых водоносных систем и объясняются известным явлением “двойной пористости” в закарстованных породах [11]. Однако такое объяснение представляется недостаточно убедительным.

Таким образом, актуальные задачи – уточнение водосборной структуры карстовых массивов Горного Крыма и выяснение их гидродинамического режима в условиях различных уровней водности. Для этого необходима серия систематиче-

ских экспериментов по мультитрассированию карстовых водообменных систем с одновременным использованием нескольких красителей, обладающих различными спектральными характеристиками. Это существенно повысит информативность результатов и достоверность численных моделей бассейнов крымских рек карстового питания.

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУБМАРИННОГО СТОКА

Среди видов водных ресурсов, связанных с карстом, в Крыму получили развитие практически неиспользуемые в хозяйстве воды субмаринного стока, разгружающиеся в прибрежной зоне шельфа Черного и Азовского морей. Для этого типа карстовых вод также характерна высокая степень канализованности стока и локализации разгрузки. Наличие зон сосредоточения выходов субмаринного стока на закарстованных участках побережья Крыма обосновано теоретическими разработками и доказано прямыми (гидрохимическими, спелеоподводными и др.) и дистанционными методами [11, 21, 25, 34, 35]. Отмечается большое разнообразие обстановок субмаринной разгрузки карстовых вод. Однако анализ локализации факелов пресных вод и их гидрогеологических условий свидетельствует о том, что среди видов разгрузки в Крыму преобладают напорная по тектоническим нарушениям и безнапорная через аллювий переуглубленных речных долин. Условия разгрузки определяют объемы и режим субмаринных источников, а следовательно – и возможность их каптирования.

Имеющиеся на сегодняшний день расчеты объемов субмаринной разгрузки имеют приблизительный оценочный характер, поскольку выполнены на основе объединения данных, полученных различными методами, и без учета отдельных прибрежных участков, где отсутствует или недостаточна гидрогеологическая информация. Тем не менее даже ориентировочные подсчеты показывают, что суммарный объем безвозвратно уходящих в море пресных вод с территории Крыма составляет $3.4 \text{ м}^3/\text{с}$, или $\sim 100 \text{ млн м}^3$ в год [34]. Только в районе м. Айя в межливневый период разгружается $>3000 \text{ м}^3/\text{сут}$. В сезон дождей этот показатель увеличивается в 8–9 раз. Годовой объем стока, перехваченный на этом участке, мог бы существенно улучшить ситуацию с водоснабжением Балаклавы и Севастополя. Следует отметить, что качество теряемых вод высокое, в большинстве случаев соответствующее ГОСТ “Вода питьевая”. Такие данные побуждают к дальнейшему более детальным исследованиям субмаринных систем стока с применением современных методик и новейшего аппаратного обеспечения. Сдерживающим фактором выступают гидрогео-

логические и гидротехнические условия, малоблагоприятные для создания сооружений по перехвату субмаринного стока на побережье или на шельфе. В одних случаях это – рассредоточенность разгрузки, большие глубины, активный волновой режим, в других – малые площади изветняковых массивов, формирующих субмаринный сток [10].

ПРОБЛЕМА ОХРАНЫ КАРСТОВЫХ ВОД

При переходе народного хозяйства Крыма на собственные, достаточно дефицитные ресурсы поверхностных и подземных вод важнейшей задачей становится оценка уязвимости карстовых вод к загрязнителям. В международной практике в качестве научной основы для проектирования зон санитарной охраны подземных водозаборов используется оценка и картирование уязвимости подземных вод к загрязнению [14, 32, 39].

За последние десятилетия в европейских странах осознана необходимость применения специальных подходов для оценки уязвимости подземных вод в условиях карста, что выразилось в разработке общей международной методологии и частных региональных методик оценки и картирования уязвимости карстовых вод [36]. Для условий Горного Крыма разработана региональная методика оценки уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению [27, 30], которая апробирована на примере Ай-Петринского массива [26, 29]. Выявлено, что наиболее уязвимые зоны карстовых водосборов – участки с высокой концентрацией карстовых форм рельефа, тальвеги балок, замыкающиеся на поноры и разрывные нарушения, а также участки голого карста, лишены почвенно-растительного покрова. К категориям “высокой” и “очень высокой уязвимости” относятся соответственно 18.6 и 7.1% площади Ай-Петринского массива (рис. 4).

Актуальная задача – оценка уязвимости карстовых вод на остальных массивах Горного Крыма, а также оценка уязвимости крупных выходов карстовых вод (полная уязвимость). Результаты последней должны стать основой для организации зон санитарной охраны карстовых водозаборов. Для выполнения оценки полной уязвимости карстовых вод необходима надежная информация о подземной структуре водосборов и о гидрологических условиях фреатической и эпифреатической зон карстовых массивов, для получения которой необходимо проведение систематических экспериментов по мультитрассированию.

ВЫВОДЫ

Растущее понимание природы, роли и закономерностей карста как геосистемы “растворимая порода – вода” имеет большое значение как для

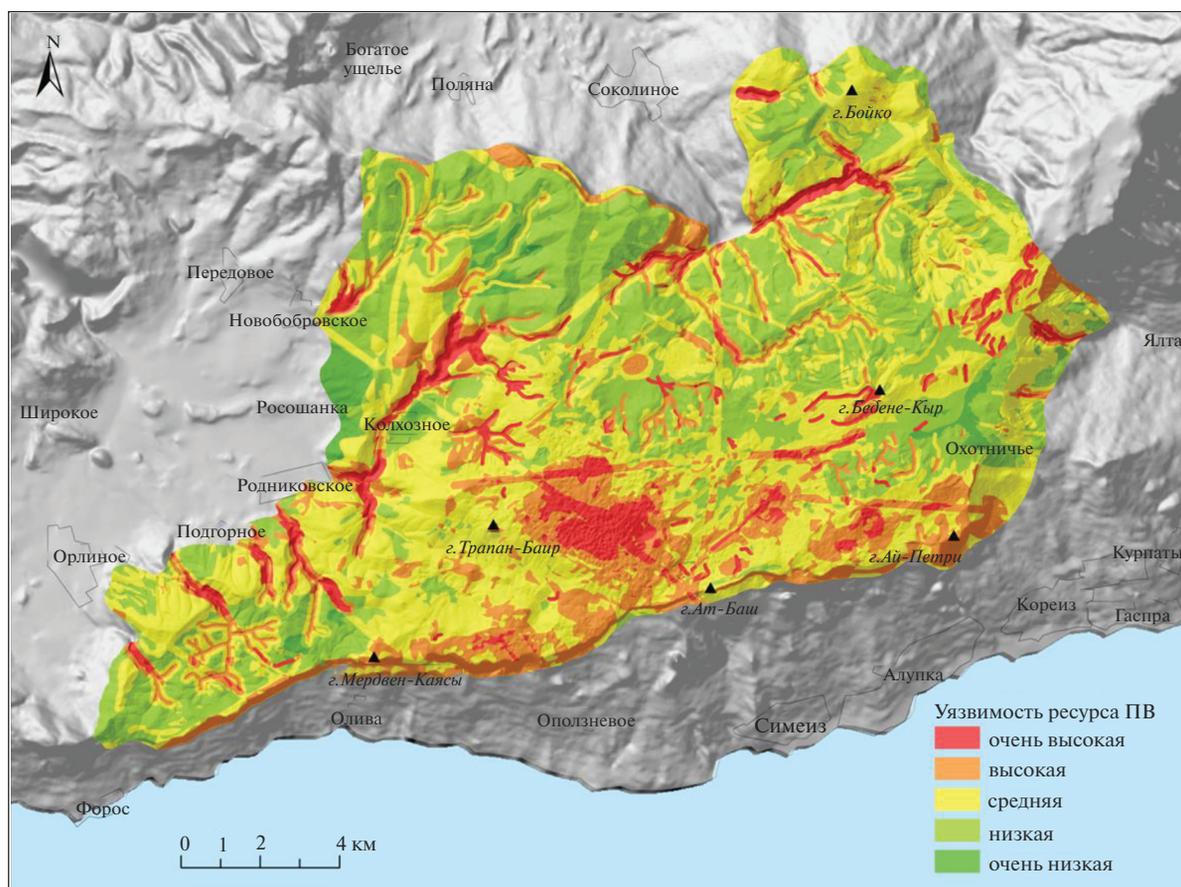


Рис. 4. Карта уязвимости ресурса подземных вод массива Ай-Петри, полученная с использованием Горно-Крымской методики [27].

теоретической гидрогеологии, так и для эффективного решения практических проблем закарстованных территорий Крыма, связанных с охраной и использованием водных ресурсов, поиском, разведкой и эксплуатацией карстогенных месторождений пресных, термальных и минеральных вод и др.

В сложившейся острой ситуации с водоснабжением Крымского региона можно выделить следующие наиболее проблематичные вопросы карстовой гидрогеологии полуострова, требующие решения в ближайшем будущем:

оценка запасов и ресурсов карстовых вод Горного Крыма, в том числе определение емкости фреатической и эпифреатической зон карстовых массивов;

оценка буферной функции эпикарстовой зоны на основе определения ее емкостных и фильтрационных параметров;

уточнение границ водосборных площадей наиболее крупных карстовых источников при разных уровнях водности;

определение доли подземного карстового стока, уходящей на питание артезианского бассейна равнинного Крыма;

оценка объемов субмаринного стока и возможностей его перехвата;

выполнение оценки полной уязвимости к загрязнениям для крупных карстовых водозаборов, необходимой для обоснования границ зон санитарной защиты;

разработка численных гидрогеологических моделей для отдельных карстовых водоносных систем и карстовых массивов.

Для решения этих вопросов предлагаются следующие направления исследовательских работ:

режимные гидрометеорологические наблюдения в области питания карстовых водоносных систем, гидрометрические и гидрохимические наблюдения в очагах их разгрузки, включающие в себя наблюдения изотопного состава атмосферных осадков и карстовых вод;

выполнение программы систематических экспериментов по мультитрассированию карстовых

вод в Горно-Крымской области на современном технологическом и методическом уровне;

спелеологические работы, направленные на выявление и документирование отдельных звеньев карстовых водоносных систем, определение их эволюционно-генетических особенностей.

Особенно следует отметить, что решающее значение для правильной интерпретации получаемой информации и последующей разработки математических моделей карстового стока имеет применение современных спелеогенетических концепций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Амеличев Г.Н.* Эволюция гипогенного карста в бассейне р.Зуя (Крым) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. Т. 5. № 4. С. 241–254.
2. *Амеличев Г.Н., Стрэнато А.Д.* Закономерности развития и распространения карста в центральной части Крыма // VI Региональная науч.-практ. конф. Карст и пещеры Кавказа: результаты, проблемы и перспективы исследований. Сочи, 2021. С. 10–19.
3. *Вахрушев Б.А.* Районирование карста Крымского полуострова // Спелеология и Карстология. 2009. № 3. С. 39–45.
4. *Ведь И.П.* Климат и облесение крымских нагорий. Симферополь: ТНУ, 2007. 136 с.
5. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / Под ред. *В.Г. Ткачука*. М.: Недра, 1970. 364 с.
6. *Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н.* Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. Новосибирск, 1992. 144 с.
7. *Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н. и др.* Распространение карстующихся пород и типов карста на территории бывшего СССР // Инженерная геология карста. Доклады международного симпозиума. Т. 2. Пермь, 1993. С. 89–95.
8. *Дублянский В.Н.* Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. Л.: Наука, 1977. 180 с.
9. *Дублянский В.Н., Вахрушев Б.А., Амеличев Г.Н., Шуттов Ю.И.* Красная пещера. Опыт комплексных карстологических исследований. М.: РУДН, 2002. 190 с.
10. *Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н.* Карстовая республика (Карст Крыма и его проблемы). Симферополь, 1996. 88 с.
11. *Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З.* Гидрогеология карста альпийской складчатой области юга СССР. М.: Наука, 1984. 128 с.
12. *Дублянский В.Н., Клименко В.И., Вахрушев Б.А., Илюхин В.В.* Карст и подземные воды горных массивов Западного Кавказа. Л.: Наука, 1985. 150 с.
13. *Дублянский В.Н., Лялько В.И., Подорван В.Н.* Подземный сток в акватории Черного моря // Геология шельфа УССР. Твердые полезные ископаемые. Киев: Наук. думка, 1983. С. 126–153.
14. *Зекцер И.С., Каримова О.А., Бужуоли Ж., Буччи М.* Региональная оценка уязвимости пресных подземных вод: методологические аспекты и практическое применение // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 6. С. 645–650.
15. *Климчук А.Б.* Роль приповерхностной зоны карстовых массивов в гидрогеологии и морфогенезе карста. Киев: ИГН, 1989. 44 с.
16. *Климчук А.Б.* Гипогенный спелеогенез и его значение в карстологии и практических приложениях // Крымские карстовые чтения: состояние и проблемы карстолого-спелеологических исследований. Симферополь, 2008. С. 8–11.
17. *Климчук А.Б.* Гипогенный спелеогенез, его гидрогеологическое значение и роль в эволюции карста. Симферополь: DIP, 2013. 180 с.
18. *Климчук А.Б.* Основные особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелеогенетический подход // Спелеология и карстология. 2008. № 1. С. 23–46.
19. *Климчук А.Б.* Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. Симферополь: Сонат, 2009. 112 с.
20. *Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Науменко В.Г., Токарев С.В.* Оценка мощности эпикарстовой зоны по распределению глубин воронок // Спелеология и карстология. 2009. № 3. С. 26–38.
21. *Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Самохин Г.В.* Особенности разгрузки пресных вод на мысе Айя (Крым) // Крымские карстовые чтения: Состояние и проблемы карстолого-спелеологических исследований. Симферополь, 2008. С. 44–47.
22. *Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н., Дублянский Ю.В., Шпетль К.* Гипогенный карст Предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. Симферополь: DIP, 2013. 214 с.
23. *Климчук А.Б., Токарев С.В.* Рекомендации по охране подземных источников питьевого водоснабжения в карстовых регионах // Спелеология и карстология. 2014. № 12. С. 5–16.
24. *Лущик А.В., Морозов В.И., Мелешин В.П., Иванов Б.Н., Коджаспиров А.А., Белокопытова Н.А., Капинос Н.Н., Парамонова Н.К., Кондрашов В.М., Улитина А.А.* Подземные воды карстовых платформенных областей Украины. Киев: Наук. думка, 1981. 200 с.
25. *Пасынков А.А., Пасынкова Л.А.* Карстово-трещинные обводненные зоны Горного Крыма и источники субмаринной разгрузки // Спелеология и карстология. 2014. № 13. С. 60–68.
26. *Токарев С.В.* Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению на примере массива Ай-Петри // Вопросы географии. Сб. 147. Спелеология и карстоведение. 2018. С. 143–160.
27. *Токарев С.В.* Уязвимость карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь: КФУ, 2020. 26 с.
28. *Токарев С.В., Амеличев Г.Н., Вахрушев Б.А., Самохин Г.В., Науменко В.Г., Брага Е.В.* Движение карстовых вод в условиях низкой водности: результаты новейшего индикаторного эксперимента в Горном Крыму // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. Сб. докл. международ. науч.конф. СПб.: СПбГУ, 2020. С. 202–207.

29. *Токарев С.В., Климчук А.Б.* Оценка и картирование уязвимости карстовых подземных вод в Горном Крыму (на примере массива Ай-Петри) // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах. Материалы Международ. симпоз. Пермь, 2015. С. 337–341.
30. *Токарев С.В., Климчук А.Б.* Развитие Горно-Крымского подхода к оценке уязвимости подземных вод карстовых районов // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 898–909.
31. *Шестопалов В.М., Блинов П.В., Лютый Г.Г., Санина И.В., Руденко Ю.Ф.* Современные принципы гидрогеологического районирования // Сб. науч. тр. УкрГГРИ. 2010. Вып. 3–4. С. 147–157 (на украинском языке).
32. *Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н.* Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. Киев, 2007. 120 с.
33. *Шестопалов В.М., Лялько В.И., Огнянник Н.С. и др.* Водообмен в гидрогеологических структурах Украины: Водообмен в естественных условиях. Киев: Наук. думка, 1989. 288 с.
34. *Юровский Ю.Г.* Особенности природных процессов в зонах субмаринной разгрузки подземных вод. Автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Киев: ИГН, 1993. 44 с.
35. *Юровский Ю.Г.* Подземные воды шельфа. Задачи и методы изучения. Симферополь, 2013. 260 с.
36. COST Action 620. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report COST Action 620 / Ed. *Zwahlen F.* Brussels: European Commission, Directorate, 2004. 315 p.
37. *Dublyansky Yu.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Langhamer L., Spötl C.* Stable isotopic composition of atmospheric precipitation on the Crimean Peninsula and its controlling factors // *J. Hydrol.* 2018. V. 565. P. 61–73.
38. *Dublyansky Yu.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Spötl C.* Groundwater of the Crimean Peninsula: A first systematic study using stable isotopes // *Isotopes Environ. Health Studies.* 2019. V. 55. Iss. 5. P. 419–437.
39. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability / Eds *J. Vrba, A. Zaporozec:* International Contributions to Hydrogeology, Int. Association Hydrogeol. Heise, Hanover, 1994. V. 16. 131 p.
40. *Klimchouk A.B.* Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. Carlsbad: National Cave and Karst Res. Inst., 2007. Special Paper 1. 106 p.
41. *Klimchouk A.B., Ford D.C.* Types of karst and evolution of hydrogeologic settings / Eds *A. Klimchouk, D. Ford, A. Palmer, W. Dreybrodt* // *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers.* Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000. P. 45–53.
42. *Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N., Dreybrodt W.* *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers.* Huntsville, 2000. 527 p.
43. *Worthington S., Ford D., Beddows P.* Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution / Eds *A. Klimchouk, D. Ford, A. Palmer, W. Dreybrodt* // *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers.* Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000. P. 423–432.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 551.4:571.6

**МЕРЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ РЕЧНЫХ СИСТЕМ
КАК ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ
ГОР КРЫМА И ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА)¹**

© 2022 г. Б. И. Гарцман^{a, b, *}, П. А. Белякова^a, К. В. Сучкова^a,
Е. А. Шекман^b, А. Л. Энтин^c

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bТихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия

^cМГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

*e-mail: gartsman@inbox.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 28.02.2022 г.

Основной мерой речных систем традиционно признается площадь водосбора, которая определяет его главную функцию – собирать атмосферные осадки. Однако речной бассейн имеет также объем и вертикальную протяженность. Необходимость учета объема речного бассейна и методической разработки понятия о его вертикальной протяженности (условно – “толщине”) следует как из общеметодологических соображений, так и из имеющегося опыта гидрологических исследований. Предложен комплекс новых оценок “толщины” и объема бассейна, характеризующих, в частности, его врез, вертикальную расчлененность, мощность зоны активного водообмена и др. Эти показатели могут существенно усилить эффективность методов структурно-гидрографической индикации в направлении анализа эрозионно-аккумулятивных процессов, стока наносов, а в регионах с явным преобладанием подземного питания – и в части параметров стока воды. Для демонстрации эффективности предложенных показателей выполнен анализ речных систем, развивающихся в контрастных геологических условиях – в Горном Крыму и в южном секторе Черноморского побережья Кавказа. Расширение инструментария, повышение детальности и информативности анализа рельефа могут иметь универсальную ценность и самую широкую область приложений в науках о Земле.

Ключевые слова: речные системы, структурно-гидрографический анализ, морфометрические характеристики рельефа, врез речной сети, вертикальная расчлененность бассейна.

DOI: 10.31857/S032105962204006X

ВВЕДЕНИЕ

Основной мерой речных систем традиционно признается площадь водосбора, ограниченного поверхностными водоразделами. Именно площадью определяется главная функция водосбора – собирать атмосферные осадки для преобразования в речной сток. Однако речной бассейн – трехмерное природное тело, т. е. он имеет объем, а также и вертикальную протяженность. В равнинных условиях она измеряется метрами и несколькими десятками метров (что несопоставимо с горизонтальными размерами бассейнов), слабо варьирует в пространстве и почти не учитывается как фактор формирования речного стока.

В качестве примера подобного учета можно упомянуть зависимости модуля речного стока от площади водосбора в диапазоне малых бассейнов (например, [10], с. 271). Модули обычно растут с площадью до достижения предельного значения, определяющего пороговое значение площади малой реки. Это объясняется увеличением глубины вреза речной системы, что сопровождается ростом подземного питания. Характерно, что и в данном случае операционной переменной выступает площадь водосбора, используемая для индикации глубины вреза.

В горах вертикальная протяженность (условно – “толщина”) даже небольших бассейнов достигает сотен и нескольких тысяч метров, чем обусловлены их очевидные отличия от равнинных бассейнов такой же площади. Роль “толщины” бассейна, выражаемой различными характеристиками вертикальной расчлененности рельефа, в этом

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-05-00353 в рамках тем FMWZ-2022-0001 и 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9), Государственного задания ИВП РАН.

случае очень существенна. Наиболее известное отражение этого факта — использование концепции высотной поясности для горных бассейнов ([10], с. 270). Однако высотной поясности подчиняются распределения климатических факторов в зависимости от абсолютной высоты [15, 16], при этом трехмерное строение самого бассейна остается за рамками рассмотрения.

Принципиальная необходимость учета объема речного бассейна и методической разработки понятия его “толщины” следует как из общеметодологических соображений, так и из имеющегося опыта гидрологических исследований. Однако прямым общепотребительным термином для “толщины” бассейна гидрология суши не располагает, систематического ее использования в анализе и расчетах нет. Для этого есть, как минимум, две причины.

Во-первых, в отличие от формально вполне строгого понятия площади водосбора, предложить формализованное определение “толщины” бассейна очень не просто. Сложность строения рельефа бассейна уже затрудняет строгое определение “толщины”, а необходимость учета переменной толщины зоны аэрации и активного водообмена, подстилаемой сложной, притом скрытой от наблюдения, поверхностью водоупора, делает такое определение пока просто невозможным. Поэтому термин “толщина” применительно к речному бассейну употребляется в кавычках. Родственными ему можно считать такие термины, как вертикальная расчлененность рельефа, врез, мощность зоны активного водообмена и другое, чья смысловая нагрузка отражает различные аспекты “толщины” бассейна.

Наиболее развитым методическим аппаратом анализа вертикальной протяженности рельефа располагает, естественно, геоморфология. Методы построения карт глубины расчленения рельефа, называемых также картами интенсивности вертикального расчленения, глубины местных базисов эрозии, относительных высот (превышений), вошли в основной инструментарий этой науки с первой половины XX в. [19] и до настоящего времени остаются предметом активной теоретической разработки и прикладного использования [2, 18, 22]. Существенным недостатком указанных работ следует считать относительно слабое внимание к использованию современных цифровых данных о рельефе и информационных технологий их обработки.

Во-вторых, в отличие от сравнительно простой и точной процедуры измерения площади водосбора [1], любые измерения вертикальных характеристик рельефа по двумерной его проекции на топографической карте слишком сложны и трудоемки для массовой реализации. Появление общедоступных цифровых моделей рельефа (ЦМР)

и геоинформационного программного обеспечения создает существенно новые возможности в этом смысле, но требует значительных усилий в части методических разработок и создания необходимых алгоритмов.

Широкое развитие методы морфологического анализа речных бассейнов получили за рубежом [34]. Если до появления ЦМР и ГИС преобладали эмпирические исследования планового рисунка речных сетей, то затем начало развиваться направление математического моделирования эрозионного развития рельефа бассейна и речной сети, основанного на базовых физических законах. Поэтапное развитие данного подхода [23, 27, 30] привело к разработке трехмерной модели “самоорганизованной фрактальной речной сети” [33–35, 29]. Одновременно с теоретическим направлением продолжает развиваться и направление эмпирического анализа рельефа, основанное на разработке и применении различных геоморфологических индексов [7, 24].

Общим ограничением при этом можно считать применение уклона в качестве основного показателя, учитывающего высотный диапазон рельефа. Уклон поверхности элементарной площадки (ячейки ЦМР) используется практически во всех формах геоморфологических индексов; корректное воспроизведение распределения локальных уклонов — одна из ключевых задач моделирования эрозионного развития рельефа. Однако представляется необходимым иметь также нелокальные характеристики высотного диапазона рельефа, отражающие как свойства бассейна в целом, так и положения отдельных элементарных площадок в трехмерной структуре бассейна.

При широком распространении карстующихся пород и карстовых явлений врез (вертикальная расчлененность) бассейна, вероятно, становится фактором, определяющим водность речной системы. Прежде всего это обусловлено значительными несовпадениями подземных водоразделов с поверхностными, так что последние не характеризуют реальные границы водосбора. Рассмотрим систематически, какие показатели “толщины” бассейна возможно получить с использованием современных ЦМР и средств их обработки, и каким образом эти показатели могут характеризовать речную систему. Для примера эффективности выбранных показателей выполним анализ речных систем, развивающихся относительно недалеко друг от друга, но в контрастных геологических условиях — в Горном Крыму и в южном секторе Черноморского побережья Кавказа [16].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ РЕЧНОГО БАССЕЙНА

Традиционные характеристики

Чаще всего как мера вертикальной протяженности бассейна употребляется диапазон высот ΔH_b – разность максимальной и минимальной (в замыкающем створе) отметок рельефа в пределах бассейна. Достоинство показателя – простота его определения. Высокое значение ΔH_b указывает на наличие в бассейне гор, однако разнообразие морфологического строения бассейна, особенно крупного, при одних и тех же значениях ΔH_b очень велико. Возможности содержательной интерпретации диапазона высот ограничены, а без учета размеров бассейна и региональных особенностей рельефа – просто слабы.

В качестве показателей горного характера и вертикальной расчлененности бассейна используются также его средняя высота \bar{H}_b и средний уклон \bar{i}_b . Их недостаток – осреднение по всей площади бассейна, в том числе достаточно крупного, т. е. избыточный уровень генерализации (как и для ΔH_b). При этом достоинство простоты определения утрачивается – расчет \bar{H}_b и, особенно, \bar{i}_b на основе топографических карт представляет собой сложную, трудозатратную и чреватую техническими ошибками процедуру. Три перечисленных показателя используются как при составлении гидрографических описаний бассейнов, так и в географическом анализе речного стока – в качестве переменных в региональных зависимостях.

Оценки вертикальной протяженности бассейна на основе ЦМР

Как упоминалось ранее [3], использование ЦМР и средств их обработки не только многократно сокращает время и усилия по определению гидрографических и морфометрических показателей бассейнов. Более важно, что современная технологическая база позволяет принципиально улучшить пространственную детализацию определения параметров рельефа, а также разнообразить алгоритмы вычисления определяемых характеристик, что приводит к необходимости их нового осмысления. То есть при разработке данной проблематики методический аспект должен преобладать над технологическим. Исходя из этого рассмотрим группу параметров, характеризующих вертикальную протяженность (врез, вертикальное расчленение) речного бассейна, их интерпретацию и возможности определения по ЦМР.

В работе [5] предложена характеристика бассейна, которую можно назвать “толщиной (объемом) по экстремумам”. Она, как и ряд последующих, рассчитывается по сетке частных во-

досборов, получаемых в процессе стандартной процедуры выделения речной сети, реализованной в ArcGIS и многих других программных средствах ГИС [4]. Сначала речная сеть выделяется как совокупность ячеек раstra ЦМР с площадью водосбора выше заданной пороговой величины. Затем неструктурированная древовидная речная сеть разбивается на элементарные бесприточные сегменты-водотоки (в терминологии ArcGIS – links), для каждого из которых строятся частные водосборы. Вся площадь бассейна представляется в форме растровой мозаики частных водосборов, с каждым из которых связан элементарный водоток – сегмент растровой речной сети. Количество частных водосборов N при разбивке бассейна зависит от величины пороговой площади, которая может определяться согласно независимым и различным соображениям. Для разумной пространственной детализации характеристик рельефа N должно составлять, по-видимому, несколько сотен.

“Толщиной по экстремумам” ΔH_e назовем средневзвешенный диапазон высот бассейна, вычисляемый по экстремальным точкам рельефа частных водосборов в соответствии с выражением

$$\Delta H_e = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{\max i} - H_{\min i}) F_i}{\sum_{i=1}^N F_i}, \quad (1)$$

где $H_{\max i}$, $H_{\min i}$ – максимальная и минимальная отметки рельефа, F_i – площадь i -го частного водосбора. Умножением ΔH_e на площадь бассейна получим его “объем по экстремумам” V_e . Эти характеристики связаны с оценкой полного эрозионного вреза в бассейне. Согласно классической концепции эрозионного цикла [11], врезание речной сети происходит от некоторой первичной выровненной поверхности. Пока на самых высоких уровнях водоразделов сохраняются ее фрагменты, оценку полного эрозионного вреза величиной ΔH_e можно считать адекватной и достаточно точной. Однако реальные процессы развития рельефа редко укладываются в классическую схему – чаще первичная поверхность бывает полностью уничтожена к текущему моменту, либо само ее существование как исходной стадии многоэтапной эволюции рельефа представляется сомнительным. В этом случае характеристики ΔH_e и V_e правильнее интерпретировать как максимальную (“сверху”) оценку исходного массива геологического субстрата, эрозионное расчленение которого привело к формированию современного рельефа бассейна [20].

Определение величины ΔH_e в геоинформационном ПО выполняется на основе вычисления зональной статистики – в качестве матрицы ис-

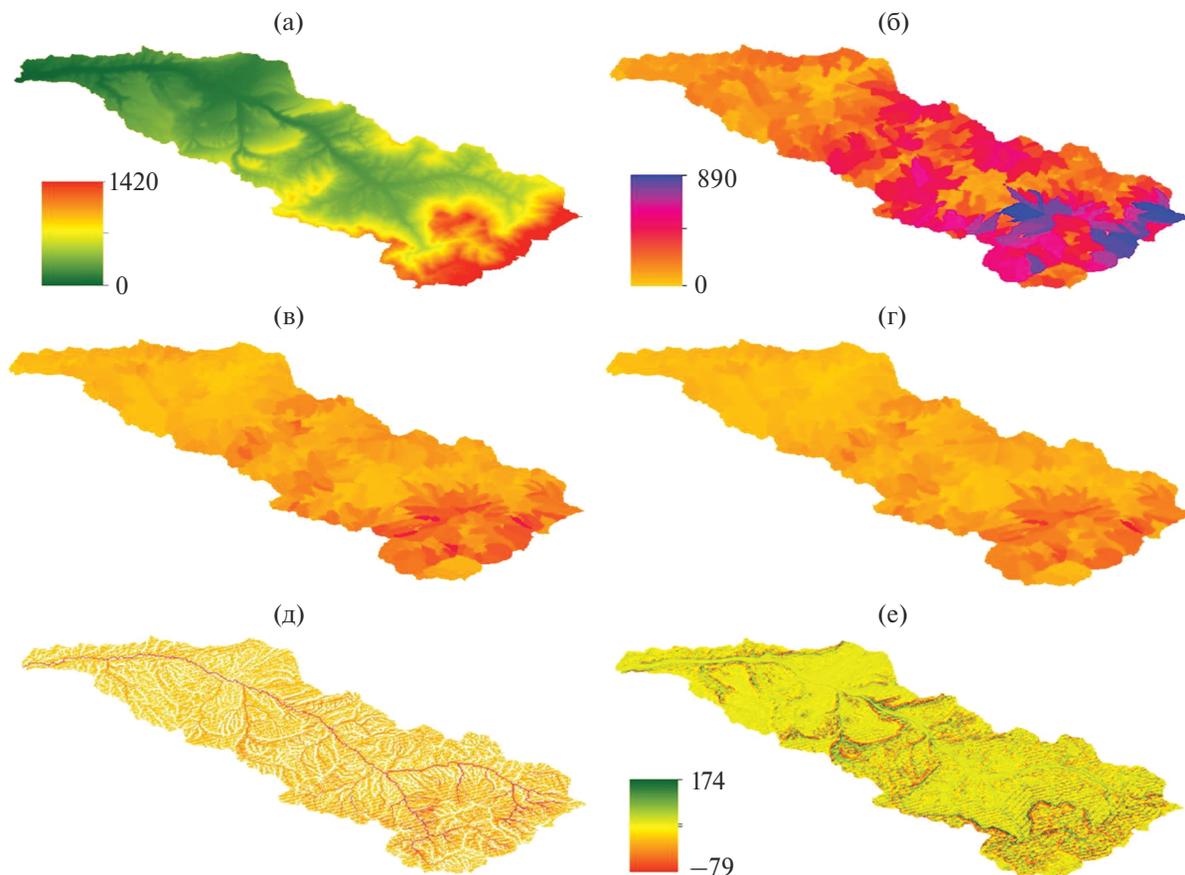


Рис. 1. Характеристики вертикальной протяженности на примере бассейна р. Бельбек: а – абсолютная высота рельефа H , м; б – “толщина по экстремумам” ΔH_e , м; в – “толщина по водоразделам” ΔH_w , м; г – “толщина по средним” ΔH_a , м; д – средний врез бассейна ΔH_c , м (белым цветом обозначены пиксели с отсутствием вреза); е – разность расчетных уклонов i_g и i_s , %. б–д – в единой вертикальной шкале.

ходных значений используется ЦМР, а зонами для агрегирования являются частные водосборы. В среде ArcGIS эта операция может быть выполнена с помощью инструмента “Spatial Analyst Tools/Zonal Statistics as Table”. Данный инструмент на выходе создает таблицу площадей (“Area”) и диапазона высот (“Range”) для всех частных водосборов. Пример исходной ЦМР речного бассейна приведен на рис. 1а, а расчетного покрытия, отражающего значения ΔH_e по сетке частных водосборов, – на рис. 1б.

Еще одна характеристика вертикальной мощности бассейна может быть названа “толщиной по водоразделам” – ΔH_w . Она вычисляется подобно ΔH_e как средневзвешенная разность высот водоразделов и водотоков. Расчетная формула для ΔH_w отличается от формулы (1) только заменой максимальной и минимальной высот на средние высоты водоразделов и водотоков для всех частных водосборов бассейна. К водоразделам относятся все краевые пиксели частных водосборов с нулевым размером водосбора. В ArcGIS выделить

краевые пиксели позволяет инструмент “Spatial Analyst Tools/Neighborhood/Focal Statistics”, который вычисляет среднее значение индекса частного водосбора по окрестности каждого пиксела 3×3 . Для пикселей, лежащих по краю частных водосборов, эти средние значения отличаются от их собственных индексов. Затем с помощью инструмента “Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator” создается растровая структура водоразделов, куда включаются только пиксели, для которых выполняется условие краевого положения, и при этом инструмент “Spatial Analyst Tools/Hydrology/Flow Accumulation” дает результат, равный 0.

Пиксели растровой структуры водоразделов наследуют индексы частных водосборов так же, как и пиксели водотоков растровой речной сети. Определение величины ΔH_w также опирается на зональную статистику, которая считается дважды: отдельно по высотам водораздельных пикселей и отдельно по высотам пикселей водотоков. В результате получаем значения площадей (“Ar-

ea”), средних высот водоразделов и водотоков (“Mean”) для всех частных водосборов. Умножением ΔH_w на площадь бассейна, можно получить его “объем по водоразделам” V_w . Эти оценки отображают диапазон высот между существующими водораздельной и тальвеговой поверхностями, т. е. актуальный врез бассейна, что характеризует возможные напоры в пределах зоны активного водообмена. Величины ΔH_w и V_w всегда меньше значений ΔH_e и V_e . Пример расчетного покрытия ΔH_w приведен на рис. 1в.

Третья мера такого же типа может быть названа “толщиной по средним” – ΔH_a – средневзвешенная разность высот водосборов и водотоков. Ее расчет выполняется также по формуле, аналогичной формуле (1), только в данном случае используются средние высоты частных водосборов и сегментов-водотоков. Умножением ΔH_a на площадь бассейна, получим его “объем по средним” V_a . Эти оценки отображают средний слой и объем горных пород, находящихся выше локальных базисов эрозии (близлежащих тальвегов), т. е. мощность зоны активного водообмена и объем экспонированного геологического субстрата [20]. Для определения величины ΔH_a нужно дважды выполнить расчет зональной статистики: сначала по растру высот с использованием мозаики частных водосборов в качестве маски, затем также по растру высот с использованием в качестве маски структуры сегментов-водотоков. В результате получаем значения площадей (“Area”), средних высот частных водосборов и водотоков (“Mean”). Величины ΔH_a и V_a всегда меньше значений ΔH_w и V_w , и тем более – значений ΔH_e и V_e . Пример расчетного слоя ΔH_a приведен на рис. 1г.

Содержательная интерпретация возможна и для отношений описываемых мер. Например, показатель $K_{ea} = \Delta H_a / \Delta H_e$ отражает долю остаточного рельефа, сохранившегося в процессе развития эрозионного цикла. Аналогичный показатель $K_{wa} = \Delta H_a / \Delta H_w$ – интегральный индикатор формы рельефа, который будет больше либо меньше 0.5 в зависимости от преобладания выпуклых либо вогнутых склонов.

Все перечисленные выше характеристики вертикальной протяженности бассейна вычисляются по дискретной мозаике частных водосборов и обусловлены их характерным размером. Представляет интерес вычисление меры, отражающей вертикальный врез бассейна непрерывно в каждой его точке – ΔH_c . Для этого необходимо дважды применить к растру направлений стекания в бассейне процедуру расчета водосборной площади (в ArcGIS это инструмент “Spatial Analyst Tools/Hydrology/Flow Accumulation”) – сначала без дополнительных опций, а затем с назначением ЦМР в качестве весовой функции (“weight ras-

ter”). Первая операция даст в каждом пикселе площадь его водосбора, вторая – сумму высот по водосбору данного пиксела. Разделив второй полученный растр на первый (в ArcGIS – с помощью “Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator”), получим в каждом пикселе среднюю высоту его водосбора. После вычитания высот самих пикселей получим в каждом из них превышение средней высоты его водосбора над высотой замыкающего створа – текущий средний врез водосбора в данной точке ΔH_c (рис. 1д). Умножив ΔH_c на площадь водосбора в каждом пикселе, получим накопленный объем бассейна V_c , непрерывно возрастающий при движении вниз по линиям тока. Обе величины – ΔH_c и V_c – в силу их непрерывности могут применяться в качестве индексов при автоматизированном выделении речной сети, что подробно обсуждается ниже.

Оценки уклонов поверхности бассейна на основе ЦМР

Уклон (крутизна склона) – это локальная морфометрическая величина, которая может быть вычислена для каждого пиксела ЦМР на основе двух различных подходов. В рамках первого подхода за крутизну поверхности i_s в пикселе принимается максимальный из уклонов линий, соединяющих его центр с центрами соседних. Эти уклоны вычисляются как отношение разности высот к расстоянию между центрами [36]. Второй подход состоит в применении методов дифференциальной геометрии – крутизна поверхности i_g определяется как угол между отвесной линией и нормалью к поверхности ЦМР, построенной в центре данного пиксела. Поле высот представляется как функция плановых координат $H(x, y)$, которая аппроксимируется полиномом некоторой степени в окрестности пиксела 3×3 , затем вычисляются значения вторых частных производных высоты по координатам [21, 36].

Как правило, говоря о “крутизне склона”, вычисляемой средствами ГИС, имеют в виду второй подход. В частности, таким образом рассчитывается уклон в ArcGIS при помощи инструмента “Spatial Analyst Tools/Surface/Slope”. Однако уклон, применяемый в гидрологических и гидравлических расчетах, соответствует скорее первому подходу (i_s). Этот уклон также может быть вычислен в ArcGIS при определении направлений стока (инструмент “Spatial Analyst Tools/Hydrology/Flow Direction”) в виде опционального выходного набора данных (“drop raster”). Значения i_g и i_s в общем случае различаются, хотя тесно коррелируют друг с другом. Заметные расхождения между ними (в обе стороны) наблюдаются в экстремальных точках и на линиях переломов рельефа (рис. 1е).

Автоматическое выделение (моделирование) речной сети

Автоматическое выделение речной сети на основе учета среднего вреза водосбора ΔH_c может быть использована для верификации роли этого фактора на примере анализа небольшого числа исследуемых объектов. Обычно моделирование речной сети по ЦМР [3, 5, 7, 35] выполняется путем выделения пикселей, в которых превышено пороговое значение некоторого индекса, характеризующего условия формирования первичного водотока. Основу таких индексов чаще всего составляет произведение накопленного расхода воды на местный уклон, причем обе эти характеристики могут быть взяты с различными коэффициентами и показателями степени. Стандартный для ГИС алгоритм выделения речной сети по пороговому значению площади водосбора представляет собой частный случай данного подхода, когда площадь рассматривается как индикатор расхода, а вариациями местных уклонов пренебрегают.

В работах [3, 5, 7, 35] описаны процедуры сопоставления результатов оцифровки речной сети по ЦМР с использованием различных индексов и реальной речной сети, оцифрованной вручную с топографических карт определенного масштаба. Применались варианты тонкого анализа сходства—различия полученных сетей для выявления наиболее подходящего индекса для выделения, т. е. фактически для выбора наиболее адекватной модели формирования первичного водотока. Аналогичную, но более “грубую” процедуру применим для сопоставления факторов формирования речной сети по степени их значимости. При такой постановке задачи будем сравнивать лишь общий рисунок речных сетей без детализации; соответственно, выводы будут более общими и качественными. Используемый метод концептуально сходен с примененным в исследовании [32].

С этой целью модели речной сети, полученной на основе площади водосбора, противопоставим модель, полученную на основе использования среднего вреза бассейна в качестве индекса. Речные сети, смоделированные на основе разных индексов, сравним с речной сетью, отображаемой на топографических картах среднего масштаба (“реальная сеть”). Автоматическое выделение всегда включает в себя этап калибровки порогового значения индекса для получения наилучшего совпадения расчетной и фактической речных сетей по заданной мере сходства. Используется самая простая и устойчивая мера — количество истоков (водотоков 1-го прядка) в речной системе, называемая также ее мощностью [13].

ОПИСАНИЕ РАЙОНОВ И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ структуры речной сети и рельефа выполнен для четырех речных бассейнов (рис. 2), два из которых расположены в горной части Крыма, еще два — в южном секторе Черноморского побережья Кавказа. Для моделирования речной сети использовался фрагмент общедоступной ЦМР с разрешением 3 арк. сек MERIT [31], приведенный к равноплощадной проекции *Europe Abers Equal Area Conic40* с размером пиксела 75×75 м. В качестве реальной речной сети используются результаты ее ручной оцифровки с топографических карт масштаба 1 : 100000.

Территорию п-ова Крым можно разделить на три части: южную — горную, северную — равнинную (степную) и восточную [9]. Горная часть простирается примерно на 150 км вдоль южного побережья в виде полосы шириной ~50 км и включает в себя три горных гряды: Главную, Внутреннюю и Внешнюю. Наибольшую высоту имеет Главная гряда, отметки ее вершин — от 1000 до 1545 м. Большая часть вершинной поверхности Главной гряды представлена возвышенными плато (яйлами), на которых массово развиты карстовые формы рельефа (воронки, колодцы и т.д.). В уступах отдельных плато и в разделяющих их пространствах развиты эрозионные формы рельефа — крутые склоны, ущелья и врезанные V-образные долины глубиной от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Высоты Внутренней и Внешней гряды в среднем составляют 500–600 и 200–350 м соответственно. Внешняя гряда, плавно понижаясь, переходит в равнину, имеющую слабый наклон на СЗ. Степная часть полуострова составляет ~4/5 его площади, имеет равнинный рельеф, в предгорьях — сильно расчлененный долинами рек.

Главная гряда Крымских гор сложена дислоцированными отложениями триаса, юры и местами — нижнего мела. Севернее на этом комплексе пород несогласно залегают меловые, палеогеновые и неогеновые отложения, слагающие моноклиналильные предгорные гряды. Равнинная часть Крыма — часть эпигерцинской платформы, с поверхности сложенная спокойно залегающими отложениями неогена. На глубине залегают палеогеновые и меловые отложения [9]. Главные реки северного макросклона Крымских гор протекают по двум основным тектоническим структурам: Южно-Крымскому мезозойско-кайнозойскому орогену и Скифской плите, охватывая все разнообразие геологических пород — от самых древних пород таврической серии до самых молодых сарматских. Карстовые явления, характерные для карбонатной толщи верхней юры, наиболее развиты в верхней части Южно-Крымского орогена, сложенного в основном осадочными породами

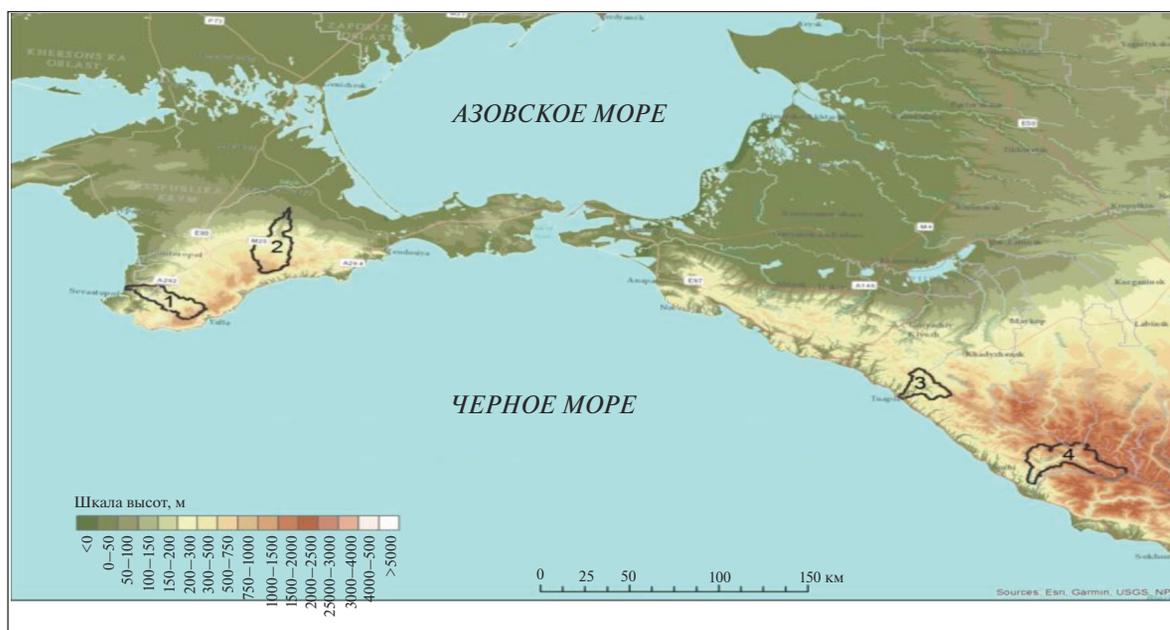


Рис. 2. Карта района исследований и расположение экспериментальных бассейнов рек: 1 – Бельбек; 2 – Биук-Карасу; 3 – Туапсе; 4 – Мзымта.

среднеюрского и верхнеюрского возраста. Через сильно закарстованные верхнеюрские известняки, подстилаемые водонепроницаемыми породами таврической серии и средней юры, происходит движение трещинных и трещинно-карстовых подземных вод, свободно сообщающихся с дневной поверхностью и движущихся под дренирующим воздействием поверхностных эрозионных процессов.

Горный Крым отличается влажным, умеренно теплым климатом с выраженной вертикальной зональностью. Средняя годовая температура воздуха $\sim +6^{\circ}\text{C}$. Здесь выпадает наибольшее количество осадков – 1000–1200 мм/год, в отличие от степной части полуострова – 325–450 мм/год. В пределах северного макросклона для анализа выбраны два бассейна – р. Бельбек до устья и р. Биук-Карасу в верхнем и среднем течении до начала бесприточного равнинного участка. По классификации водного режима Б.Д. Зайкова, обе реки относятся к крымскому типу [15], характеризующемуся паводками в течение большей части года, за исключением периодов летней или летне-осенней межени. Важную, пока еще недостаточно изученную, роль в питании рек Крыма играют воды карстовых источников, режим которых по характеру близок к режиму поверхностных водотоков.

Черноморское побережье Кавказа (ЧПК) относится к южному склону Западного Кавказа. На территории ЧПК выделяются четыре высотных пояса: высокогорный (1500–3300 м абс.), среднегорный (500–1500), предгорный (40–500) и при-

брежный (10–40 м абс). Высокогорный пояс простирается полосой от верховьев р. Туапсе до верховьев р. Мзымты, расширяясь местами до 30 км [12]. Рельеф горной части сформирован интенсивными эрозионно-тектоническими процессами. Здесь развиты глубокие, узкие ущелья, узкие водораздельные хребты, характерная крутизна склонов составляет до 50° – 60° . Встречаются также карстовые формы рельефа (массивы Алек, Воронцовский, Ахун, Ахцу, Дзыхра и Ахштырь, три последних затрагивают среднюю часть бассейна р. Мзымты) [12, 17]. Ближе к побережью располагается зона холмистых предгорий высотой от 30 до 660 м. Это территория развития легко разрушающихся палеогенных некарстующихся отложений, для которой характерны пологие водоразделы, широкие речные долины, густая эрозионная сеть.

В пределах исследуемого района для анализа были также выбраны два бассейна – р. Туапсе до устья и р. Мзымты до начала селитебных районов г. Сочи. Район характеризуется развитием отложений палеозоя, мезозоя и кайнозоя [8]. Горная часть представлена в основном отложениями юрского и мелового возраста. Предгорье и прибрежная часть относятся к палеогеновой, неогеновой и четвертичной системам. В бассейнах рек Туапсе и Мзымты распространены вулканогенно-осадочные, осадочные и терригенно-карбонатные флишевые отложения юры, представленные аргиллитами с прослоями песчаников, алевролитов и горизонтами туфов, а также отложения меловой системы, сложенные глинами и мергелями с про-

Таблица 1. Сводка параметров исследуемых водосборов

Параметр	р. Бельбек	р. Биюк-Карасу	р. Туапсе	р. Мзымта
Площадь F , км ²	492.5	631.0	356.0	896.6
Ср. высота \bar{H}_b , м	416.8	409.2	370	1343
Диапазон высот ΔH_b , м	1420	1185.5	1396	3189
Ср. уклон i_g , м/м	0.181	0.096	0.278	0.462
Ср. уклон i_s , м/м	0.194	0.104	0.292	0.488
Толщина ΔH_e , м	290.9	155.8	438.2	767.0
Объем V_e , км ³	143.5	98.2	156.0	687.6
Толщина ΔH_w , м	104.9	56.4	174.5	336.1
Объем V_w , км ³	51.7	35.5	62.1	301.3
Толщина ΔH_a , м	88.4	43.5	127.2	241.0
Объем V_a , км ³	43.6	27.4	45.3	216.0
Толщина ΔH_c^* , м	408.7	355.0	368	1275
Объем V_c , км ³	122.7	223.9	131.0	1143.1
Коэффициент K_{ea}	0.304	0.279	0.290	0.314
Коэффициент K_{wa}	0.843	0.772	0.729	0.717

* Оценки среднего вреза бассейна ΔH_c и соответствующего объема V_c приведены для замыкающего створа каждого из бассейнов.

слоями известняков, алевролитов и песчаников. Низовья бассейна представлены песками, глинами с прослоями песчаников, алевролитов, мергелей.

Климат ЧПК в горной части континентальный с дождливым летом и холодной снежной зимой, среднегодовая температура +4...+8°C. В прибрежной части климат субтропический, теплый и влажный. Среднегодовая температура здесь +9...+14°C. Снег выпадает редко, большая часть осадков выпадает зимой в виде дождей. Среднегодовое количество осадков в горной части составляет 1400–2400 мм, в прибрежной – от 1200 мм [16]. Реки территории ЧПК имеют неустойчивый режим и смешанное питание за счет дождевых, снеговых и подземных вод, соотношение которых варьирует в зависимости от высоты бассейна, открытости влагонесущим потокам и других факторов.

АНАЛИЗ СТРОЕНИЯ РЕЧНЫХ СИСТЕМ В СВЯЗИ С ПОКАЗАТЕЛЯМИ “ТОЛЩИНЫ” БАСЕЙНОВ

Четыре отобранных речных бассейна обладают некоторыми чертами сходства (табл. 1). Все они относятся к малым бассейнам, их площади меняются в интервале 300–1000 км². Для трех бассейнов характерно преобладание в рельефе средне- и низкогогорий, а в режиме стока – паводков дождевого и смешанного генезиса. В бассейне р. Мзымты есть еще значительная территория

высокогорий, что связано с обособлением в режиме фазы весенне-летнего половодья [16]. Составление бассейнов выполняется для демонстрации возможности выявлять структурно-морфометрические различия в их развитии, обусловленные региональными особенностями геологического строения, путем анализа ЦМР средствами ГИС. Главные особенности – широкое распространение мощных толщ карстующихся пород в центральной части массива Крымских гор и высокая интенсивность процессов тектонического воздымания в южном секторе ЧПК.

В табл. 1 сведены результаты вычислений описанных выше параметров для исследуемых бассейнов. Некоторые особенности их рельефа являются уже на уровне интегрированных параметров. Бассейны рек Бельбек, Биюк-Карасу и Туапсе близки между собой по размеру, средней высоте и диапазону высот. Однако оценки среднего уклона по Туапсе в 1.5–3.0 раза выше, чем у двух крымских бассейнов, такие же соотношения характерны для средневзвешенных оценок “толщины” бассейнов ΔH_e , ΔH_w и ΔH_a . Если рассмотреть отдельно пару бассейнов ЧПК, то параметры уклонов и “толщины” превышают аналогичные показатели для двух крымских бассейнов в 2.5–3.0 раза. Это отражает значительно большую степень вертикальной расчлененности рельефа у бассейнов, формирующихся в условиях интенсивного тектонического воздымания.

Значения коэффициента K_{ea} (доля остаточного рельефа) для всех бассейнов демонстрируют большую устойчивость, что представляет самостоятельный интерес. Однако дать содержательную интерпретацию этому показателю на представленном ограниченном материале вряд ли возможно. Показатель формы склонов K_{wa} фиксирует преобладание выпуклых склонов на территориях всех бассейнов и также сравнительно устойчив, но для пары крымских бассейнов его значения все-таки заметно выше, чем для бассейнов ЧПК. Это отражает широкое распространение в Горном Крыму платообразных форм рельефа на максимальных его отметках, в отличие от ЧПК. Относительно небольшая разница в значениях K_{wa} недостаточно информативна для фиксации указанных различий, что может быть компенсировано более развитыми средствами анализа.

Чтобы подчеркнуть роль карста в формировании речных бассейнов Крыма и их стока, выполнены эксперименты по моделированию (автоматизированному выделению) речных сетей всех четырех экспериментальных объектов. Методика проведения экспериментов кратко освещена выше, а подробно изложена в публикациях [3, 5, 7]. В данном случае эксперимент основан на визуальном сопоставлении рисунка реальной речной сети каждого бассейна с двумя вариантами модельных речных сетей. Первый вариант реализует простейшую, стандартную для многих ГИС процедуру выделения речной сети по ЦМР на основе пороговой площади водосбора. Второй вариант основан на фиксации в качестве признака точки формирования первичного водотока достижения пороговой величины среднего вреза вышележащего водосбора ΔH_c . При этом, если ниже по линии тока средний врез местами становится меньше порогового значения, то водоток все равно строится непрерывно от первой точки формирования до устья с помощью специальной процедуры.

Таким образом, первый вариант моделирования основан на признании главным фактором формирования речной сети объема осадков, собираемых поверхностью водосбора. Индикатором объема собираемых осадков служит площадь водосбора, которая не только применяется для этого непосредственно, но и входит в формулы вычисления практически всех других известных индексов [35]. Альтернативный вариант основан на признании ведущей роли в питании речной сети глубины ее вреза, являющегося индикатором мощности и объема дренируемых водоносных горизонтов. Если полученные варианты моделированных речных сетей наглядно различаются, то визуальное сопоставление их с реальной речной сетью позволит сделать некоторые выводы о роли того или другого фактора в формировании исследуемых речных систем.

Все сравниваемые варианты речных сетей для четырех бассейнов представлены на рис. 3, где различия бассейнов Крыма и ЧПК видны вполне отчетливо. Для двух бассейнов ЧПК оба варианта модельных сетей, откалиброванных на примерно одинаковое с реальной сетью число истоков, дают примерно одинаковый общий рисунок речной сети, достаточно хорошо совпадающий и с реальной сетью. Еще раз подчеркнем, что при сравнении пренебрегаем локальными несовпадениями вариантов по протяженности, местоположению и порядку слияния отдельных водотоков. В целом для бассейнов ЧПК характерно полное и относительно равномерное заполнение речной сетью всей их площади. Вариации плотности сетей друг относительно друга в пределах бассейнов присутствуют, но они слабо различимы визуально. Кроме того, отчетливо видна значительно большая степень развития речной сети в бассейнах ЧПК по сравнению с бассейнами Крыма. Если выше обсуждалась различия параметров вертикального расчленения бассейнов двух регионов — в 1.5–3.0 раза, то аналогичная разница в частоте водотоков достигает 5–10 раз.

Все это подтверждает, что при расположении бассейна на плотных подстилающих породах в условиях интенсивных восходящих тектонических движений в формировании речного стока преобладают поверхностные механизмы, а развитие речной системы определяется эрозионным расчленением поверхности водосбора. При этом речная система и ее бассейн стремятся к состоянию, названному одним из авторов “органичным” [5, 6], и в течение своей эволюции постоянно находятся относительно близко к этому состоянию.

Для обоих бассейнов Крыма варианты автоматического выделения по пороговой площади и по пороговому среднему врезу дают существенно различающиеся рисунки речной сети. В отличие от первого, второй вариант дает рисунок сети, не покрывающей площадь бассейна относительно равномерно, а сосредоточенной в определенном “очаге” формирования, сильно смещенном к верхней части бассейна. В “очаге” речная сеть отличается большими, но неравномерными густотой и разветвленностью, быстро набирает свою максимальную мощность, после чего на дальнейшем протяжении речная система представлена только главным руслом. В верхней части бассейна отмечены значительные участки отсутствия водотоков, а в нижней, за исключением главного русла, водотоков нет совсем.

Сопоставление второго варианта модели речной сети с реальной для рек Бельбек и Биюк-Карасу (рис. 3.2а, 3.3а, 3.2б, 3.3б) показывает их близкое сходство при сильном отличии реальной сети от первого варианта модели по пороговой

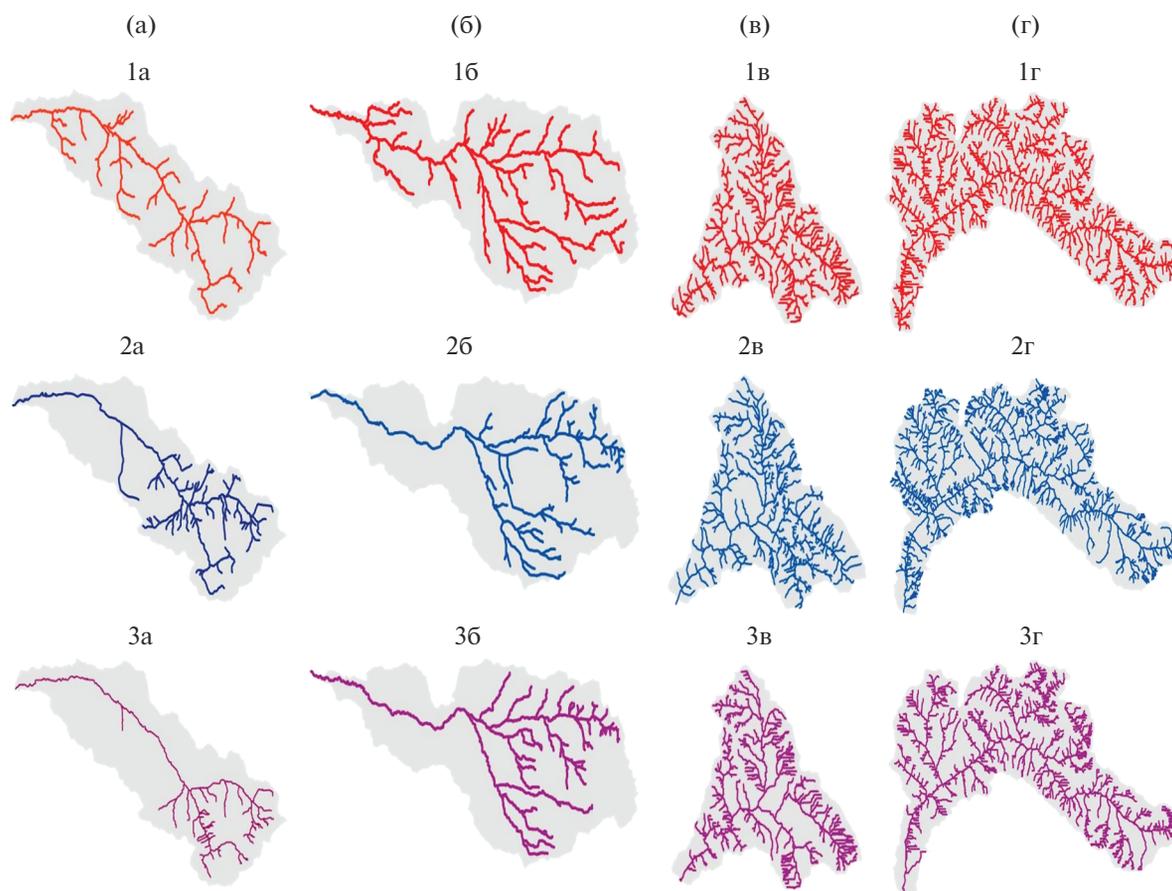


Рис. 3. Сопоставление рисунков речной сети бассейнов рек: а – Бельбек; б – Биук-Карасу; в – Туапсе; г – Мзымта. Варианты речной сети одинаковой мощности (при одинаковом количестве истоков) получены для каждого бассейна различными способами: 1 – стандартное автоматизированное выделение по пороговому значению площади водосбора; 2 – ручная оцифровка речной сети с карты масштаба 1 : 100000; 3 – автоматизированное выделение по пороговому значению глубины вреза водосбора.

площади (рис. 3.1а, 3.2а). Для бассейна р. Бельбек модель речной сети по врезу отличается несколько избыточным смещением “очага” формирования к верхней части бассейна, в реальности он располагается ниже по течению главной реки. Не исключено, что в данном случае рельеф отражает не только современную ситуацию, но и некоторую историю ее развития, т. е. в прошлом карстовые источники, формирующие истоки р. Бельбек, могли располагаться выше их современного положения.

В бассейне р. Биук-Карасу наблюдается очень близкое совпадение “очага” формирования сети на втором варианте модели и в реальности, но внутри него прослеживаются крупные несовпадающие неоднородности густоты сети и крупные перехваты. Это отражает, по-видимому, особенно широкое и мощное развитие карста в верховьях Биук-Карасу, которая уникальна даже в пределах Крыма – эта река не имеет верховьев, начинаясь в ущелье у подножия обширной Кара-

би-яйлы от крупнейшего в регионе источника Карасу-Баши сразу со средним расходом 1.5 м³/с [14].

Описанные различия строения планового рисунка речных систем очевидным образом отражают главную особенность крымских рек, у которых основной сток формируется сложными многоярусными системами подземных потоков в мощных толщах карстующихся пород, а на поверхности водораздельных пространств преобладает не эрозионный, а карстовый рельеф. Для речных систем в таких условиях характерны значительные несовпадения границ и размеров поверхностных и подземных бассейнов, а также слабая связь пространственной организации стокоформирования и дренажа со структурой поверхностных тальвегов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен комплекс характеристик бассейна как объемного тела, который закономерно развивает инструментарий структурно-гидрографиче-

ского анализа речных систем. Предположительно, эти характеристики расширят возможности индикационного подхода к оценке параметров гидрологического режима, суть которого заключается в поиске расчетных региональных зависимостей между отдельными параметрами стока и характеристиками строения и морфологии речных систем. Методы структурной индикации как отдельное направление в гидрологии выделились относительно недавно [13, 25, 28, 35]. Предлагаемые показатели “толщины”, объема, вреза, вертикальной расчлененности бассейна, по-видимому, могут повысить эффективность индикационных методов в активно развивающемся направлении анализа эрозионно-аккумулятивных процессов, стока наносов [26, 32, 36, 38], а в регионах с явным преобладанием подземного питания – и в части оценки параметров стока воды.

С другой стороны, в статье отражены усилия авторов, направленные на развитие алгоритмов обработки и анализа рельефа с использованием общедоступных ЦМР среднего масштаба и инструментария современных ГИС. Поэтому применяемые в статье алгоритмы описаны подробно, с перечислением всех этапов обработки и применяемых инструментов наиболее популярной в настоящее время ГИС ArcMap. Расширение инструментария, повышение детальности и информативности анализа рельефа могут иметь универсальную ценность и самую широкую область приложений в геоморфологии, геологии и других разделах наук о Земле.

Авторы выражают благодарность А.М. Тарбеевой (МГУ) за обсуждение работы и ценные замечания к статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булавко А.Г. Водный баланс речных водосборов. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 304 с.
2. Гайворонская Н.И. Картометрические и морфометрические показатели как основа для выявления природных предпосылок развития экзогенных геоморфологических процессов на территории белгородской области // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 932.
3. Гарцман Б.И. Анализ геоморфологических условий формирования первичных водотоков на основе цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2013. № 1. С. 136–147.
4. Гарцман Б.И. Опыт гидрографического и ландшафтного описания речного бассейна на основе ГИС и геоданных // Метеорология и гидрология. 2014. № 6. С. 67–79.
5. Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай Н.Д., Красноперев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природ. ресурсы. 2008. № 2. С. 116–123.
6. Гарцман Б.И., Галанин А.А. Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 27–37.
7. Гарцман Б.И., Шекман Е.А. Возможности моделирования речной сети на основе ГИС-инструментария и цифровой модели рельефа // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 86–98.
8. Гидрогеология СССР. Т. IX. Северный Кавказ / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1968. 488 с.
9. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1970, 364 с.
10. Догановский А.М. Гидрология суши (общий курс). СПб.: РГГМУ, 2012. 524 с.
11. Кинг Л. Морфология Земли. М.: Прогресс, 1967. 559 с.
12. Клименко В.И., Куканов В.М., Прокофьев С.С. Подземные воды Черноморского побережья Кавказа и их охрана. М.: Наука, 1979. 100 с.
13. Кoryтный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: ИГ СО РАН, 2001. 164 с.
14. Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т. I. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское кн. изд-во, 1963. 445 с.
15. Олиферов А.Н., Тимченко З.В. Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с.
16. Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону: Донской изд. дом, 2012. 607 с.
17. Рекомендации по проведению инженерно-геологических изысканий карстовых областей Черноморского побережья СССР / ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1986. 64 с.
18. Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 250 с.
19. Спиридонов А.И. О картах энергии рельефа. М.: Географгиз, 1952. 188 с.
20. Уфимцев Г.Ф. Горы Земли (климатические типы и феномены новейшего орогенеза). М.: Науч. мир, 2007. 352 с.
21. Шарый П.А. Топографический метод вторых производных // Геометрия структур земной поверхности. 1991. Р. 30–60.
22. Якименко Э.П. Морфометрия рельефа и геология. Новосибирск: Наука, 1990. 201 с.
23. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Physical Rev. A. 1988. V. 38. № 1. P. 364–374. <https://doi.org/10.1103/physrev.38.364>
24. Borselli L., Cassi P., Torri D. Prolegomena to Sediment and flows connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment // Catena. 2008. V. 75. № 3. P. 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
25. Buffington J.M., Montgomery D.R. Geomorphic classification of rivers // Treatise on Geomorphology: Fluvial Geomorphology / Eds J. Shroder, E. Wohl. V. 9. San Diego, C.A.: Acad. Press, 2013. P. 730–767.
26. Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V., Reichenbach P. GIS techniques and statistical models in

- evaluating landslide hazard // *Earth surface processes and landforms*. 1991. № 16 (5). P. 427–45.
27. *Colaioni F., Flammini A., Maritan A., Banavar J.R.* An Analytical and Numerical Study of Optimal Channel Networks // PACS numbers: 64.60.Ht, 64.60.Ak, 92.40.Fb (arXiv:cond-mat/9610004v2 [cond-mat.stat-mech] 9 Oct 1996)
28. *Fryirs K.A., Brierley G.J.* Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape. Wiley-Blackwell, 2013. 368 p.
29. *Gupta V.* Emergence of statistical scaling in floods on Channel networks from complex runoff dynamics // *Chaos Solitons and Fractals*. 2004. V. 19. № 2. P. 357–365.
[https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(03\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00048-1)
30. *Howard A.D.* Theoretical model of Optimal Drainage Network // *Water Res. Res.* 1990. V. 26. № 9. P. 2107–2117.
<https://doi.org/10.1029/WR026i009p02107>
31. http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/
32. *Martinez F., Ojeda A., Manríquez H.* Application of fractal theory to describe the morphological complexity of large stream networks in Chile // *Water Resour.* 2022. V. 49. № 2.
33. *Rinaldo A., Maritan A., Colaioni F., Flammini A., Rigon R., Rodriguez-Iturbe I., Banavar J.R.* Thermodynamics of Fractal Networks // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 76. № 18. P. 3364–3367.
34. *Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I., Rigon R., Ijjasz-Vasquez E., Bras R.L.* Self-Organised Fractal River Networks // *Phys. Rev. Lett.* 1993. V. 70. № 6. P. 822–825.
35. *Rodrigues-Iturbe I., Rinaldo A.* Fractal River Basin. Chance and Self-organization. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 547 p.
36. *Soeters R., Van Westen C.J.* Slope instability recognition, analysis and zonation // *Landslides: investigation and mitigation*. 1996. № 247. P. 129–77.
37. *Warren S.D., Hohmann M.G., Auerswald K., Mitasova H.* An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data // *Catena*. 2004. V. 58. № 3. P. 215–233.
38. *Wheaton J.M., Brasington J., Darby S.E., Sear D.A.* Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets // *Earth surface processes and landforms. British Geomorphol. Res. Group*. 2010. № 35 (2). P. 136–56.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 556.04+556.166

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПАВОДКИ НА РЕКАХ КРЫМА В 2021 ГОДУ¹**© 2022 г. Г. С. Ермакова^{a, b, *}, О. В. Горелиц^{a, b}, К. К. Жбаков^{a, b},
И. В. Землянов^b, И. Ю. Милютина^{a, b}**^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия^bГосударственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова,
Росгидромет, Москва, 119034 Россия*e-mail: ermakova_gs@mail.ru

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 25.01.2022 г.

Принята к публикации 28.01.2022 г.

Представлены результаты исследований экстремальных паводков, прошедших на реках Крыма летом 2021 г. Проведено аналитическое и историческое обобщение проблемы негативного воздействия вод и селевых потоков в Крыму, выполнен анализ факторов формирования паводков и селей на реках Крыма в 2021 г. Проведена оценка максимальных расходов и уровней воды паводков, детально исследована динамика распространения волны паводка в бассейне р. Бельбек. Отмечена уникальность произошедших опасных гидрологических явлений, дана оценка их негативных последствий.

Ключевые слова: Крым, паводки, максимальные расходы воды, затопления, негативное воздействие вод.

DOI: 10.31857/S0321059622040046

ВВЕДЕНИЕ

Летом 2021 г. на реках Крыма прошла серия экстремальных паводков, в результате которых были зафиксированы обширные затопления населенных пунктов и активизация опасных эрозионных и русловых процессов. Цель настоящей работы – исследование причин формирования, анализ условий прохождения, оценка экстремальности прошедших паводков и их негативных последствий.

Для исследования выбраны бассейны рек, расположенные в трех районах Крыма и различающихся по условиям формирования и прохождения паводков. На основе анализа материалов, предоставленных Крымским УГМС, а также информации из СМИ и открытых интернет-источников, из обширного перечня рек, на которых летом 2021 г. были зафиксированы паводки, были выбраны бассейны тех рек, на которых произошли наиболее значимые по масштабу и последствиям события:

бассейны рек Дерекойка и Учан-Су (Ялта) – паводок/сель 17–18 июня;

бассейны рек Мелек-Чесме, Катерлез и Булганак (Керчь) – паводки 17–18 июня и 12–16 августа; бассейн р. Бельбек – паводок 4–5 июля.

Актуальность проведенного исследования имеет два различных аспекта.

Первый аспект – чисто практический – в целях обеспечения водной безопасности Крыма необходима объективная оценка негативных явлений и причин их формирования. Согласно данным МЧС [10], сели и паводки по числу вызванных ими смертей относятся к двум самым опасным природным явлениям в Крыму. Как показано ниже, случившиеся летом 2021 г. на реках Крыма паводки были выдающимися по своим гидрологическим характеристикам. И настолько же “выдающимся” было их негативное воздействие, принесенный ущерб населению и объектам инфраструктуры.

Второй аспект связан с более глобальными вопросами. Многие исследователи указывают на повышение экстремальности гидрологических явлений на реках России (в том числе и на территории Крыма) и Европы в период с конца XX в. по настоящее время, что связывается в первую очередь с климатическим фактором [3, 6, 21, 36, 38, 39, 41–43]. Согласно большинству прогнозов, эта тенденция сохранится и в будущем, поэтому важно понимать, как эти события формируются и ка-

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № 0126-2021-0001, государственная регистрация № 121040700170-9).

кие последствия влекут за собой. Прошедшие летом 2021 г. паводки на реках Крыма могут быть еще одним звеном в ряду таких экстремальных событий.

В работе использован обширный объем исходной информации – как архивной (базы данных инструментальных наблюдений за гидрометеорологическими характеристиками на гидрологических постах и метеостанциях Крымского УГМС, научные публикации, литературные источники по теме исследования, публикации в СМИ), так и актуальной, полученной коллективом авторов в процессе выполнения комплексных полевых работ в сентябре 2021 г.

ПРОБЛЕМА НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОД И СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ В КРЫМУ

Характерная особенность гидрологического режима рек и временных водотоков Крыма – формирование паводков в течение всего года вследствие интенсивных ливневых осадков или при интенсивном снеготаянии с одновременным выпадением осадков [33]. В горных областях, особенно в регионе Южного берега Крыма (ЮБК) на участке от Ялты до Судака, где в овражно-балочной сети и долинах рек имеется достаточно большое количество обломочного материала, паводки зачастую проходят в виде разрушительных грязекаменных и водокаменных селей.

Богатый опыт научных исследований и обобщений по паводкам и селям [4, 5, 13, 16–18, 21, 22, 27–30, 33], а также широкое освещение темы опасных явлений в публикациях МЧС [10, 20], ежегодных изданиях исполнительных властей Крыма [11] и СМИ позволил авторам создать базу данных по негативному воздействию вод и селевых потоков в Крыму. Собран каталог событий, зафиксированных на территории Крыма за период с 1815 г. по настоящее время, – всего 153 события с указанием времени и места, возможных причин и негативных последствий. Собранный каталог свидетельствует о том, что экстремальные гидрологические явления, вызывающие негативные последствия, – не редкость для региона. Анализ материалов позволяет сделать некоторые обобщения пространственной и временной неоднородности негативных явлений. На рис. 1 представлена карта распространения негативных событий по территории Крыма, которая наглядно демонстрирует географию явлений: сели тяготеют к региону ЮБК, затопления характерны для территорий вдоль крупных рек – Альмы, Качи, Бельбека, Салгира, подтопления – для степных районов на севере Крыма, лишенных развитой гидрографической сети и постоянных водотоков.

Наиболее высок риск негативных последствий паводков и селей – на территории городских

округов Судака, Алушты, Ялты, Феодосии и Керчи, а также Бахчисарайского и Симферопольского районов. Это связано, с одной стороны, с наибольшей частотой формирования в этих районах экстремальных гидрометеорологических явлений, а с другой стороны – с наибольшей плотностью населения и застройки.

В историческом аспекте также выделяются определенные тенденции – активизации и затухания опасных процессов, приводящих к негативным последствиям. На рис. 2 приведена диаграмма изменения количества экстремальных событий по десятилетиям. Степень освещенности недавних событий гораздо выше, чем у событий, произошедших 50–100 лет назад. Поэтому максимум числа экстремальных событий в последнее десятилетие – отражение не увеличения активности негативных явлений по сравнению с предыдущими десятилетиями, а скорее степени подробности освещения вопроса в источниках информации. Анализ диаграммы на рис. 2 позволяет сделать выводы относительно общих тенденций изменения количества негативных явлений. В частности, обращает на себя внимание относительное увеличение количества событий в 1910-е, 1960-е и 1990-е гг. В то время как 1920–1930-е, 1950-е и 1970-е гг. характеризуются относительным уменьшением количества негативных явлений. Имеет место чередование периодов повышенной и пониженной активности.

Скорее всего, это связано с колебаниями метеорологических показателей, так как именно они – главный фактор формирования негативных явлений. Так, в [17] активизация селей в Крыму связывается с периодами повышения солнечной активности, а также с нарушением зональной циркуляции и усилением меридионального переноса воздушных масс.

Анализ локальных годовых максимумов показал, что наиболее выдающимся годом по количеству событий (13) за весь анализируемый период был 1997 г., который, по данным метеостанции Ай-Петри, был также и наиболее выдающимся по количеству дней (47) с осадками >10 мм за весь период наблюдений (1896–2021 г.).

АНАЛИЗ ПРИЧИН ФОРМИРОВАНИЯ ПАВОДКОВ 2021 г.

Паводки в Крыму формируются под воздействием гидрометеорологических условий и факторов подстилающей поверхности. К гидрометеорологическим условиям относится количество выпадающих осадков, их интенсивность, продолжительность. К факторам подстилающей поверхности относятся характеристики водосбора, определяющие потерю стока, скорость добегания воды по склонам, концентрацию и движе-

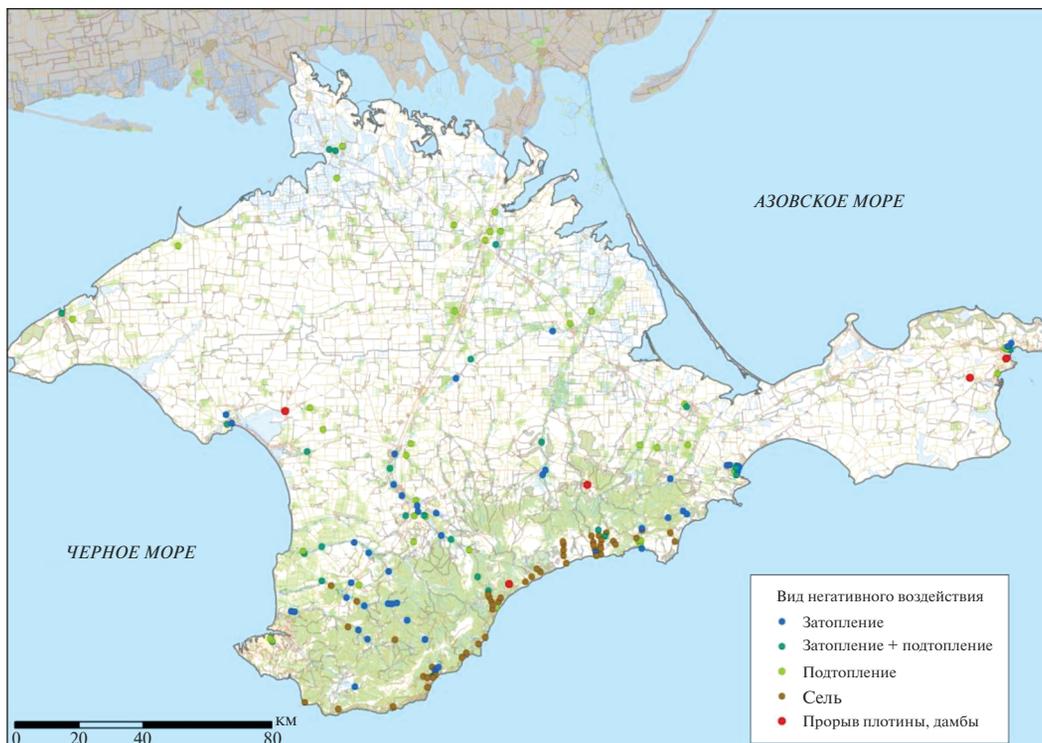


Рис. 1. Карта событий, связанных с негативным воздействием вод и селевых потоков, за период с 1815 г. по настоящее время (по материалам каталога).

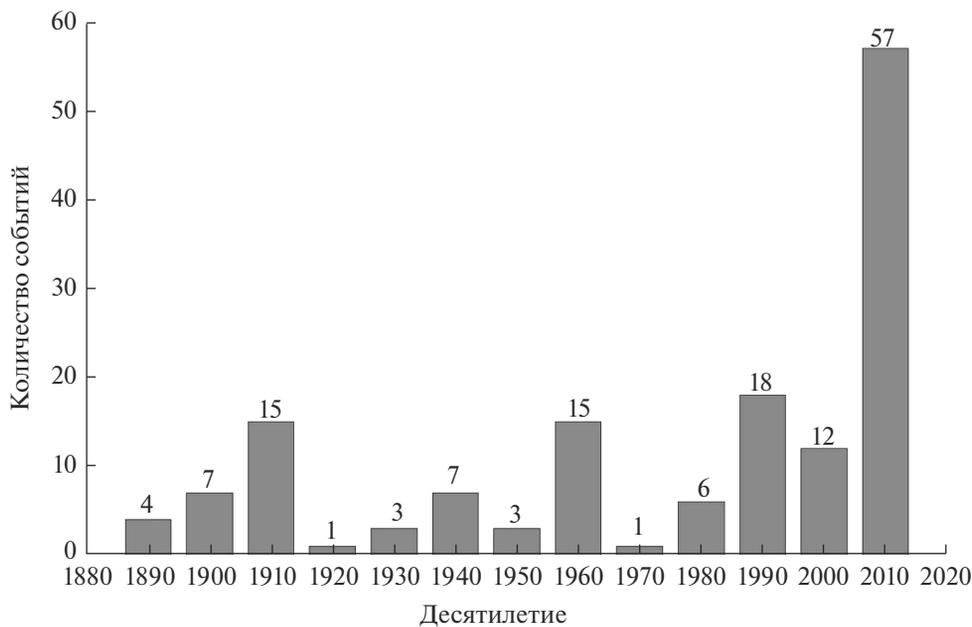


Рис. 2. Количество событий, связанных с негативным воздействием вод и селей, по десятилетиям.

ние воды в русле реки и др. [16]. В число характеристик водосбора, влияющих на формирование паводков, входят: площадь водосбора, средняя высота водосбора, рельеф и геологическое строе-

ние, почвенный и растительный покров, залесенность, закарстованность, а также антропогенные факторы (вырубка лесов, застройка берегов рек, создание водохранилищ и пр.). Подробно влия-

Таблица 1. Сравнение суточного слоя осадков в даты прохождения паводков с максимальным суточным слоем осадков за период наблюдений (н. в. — настоящее время)

Метеостанция (период наблюдений)	Суточный максимум осадков за весь период наблюдений, мм (дата) [2]	Суточные слои осадков в дни прохождения паводков в 2021 г., мм [32]		
		Июнь	Июль	Август
Керчь (1936—н. в.)	146 (06.06.1954)	87.4 (17.06.2021)	0.4	51 (12.08.2021) 63 (13.08.2021)
Ай-Петри (1895—н. в.)	215 (17.12.1962)	295 (18.06.2021)	85 (04.07.2021)	0.7
Ялта (1881—н. в.)	135 (17.07.1910)	134 (18.06.2021)	34 (04.07.2021)	0

ние всех перечисленных факторов рассмотрено в [17, 24, 25, 33, 40, 41].

Для образования селей, помимо перечисленных гидрометеорологических условий и рельефа, необходимое условие — наличие значительного количества обломочного материала, формирующегося на склонах в виде оползней, осыпей и обвалов, а также выносимого из оврагов и небольших притоков [16].

Безусловно, главный фактор формирования паводков в Крыму — метеорологический. Именно он запускает процесс формирования паводка. Локальные местные условия, особенности водосборов и русловой сети могут либо усилить, либо ослабить мощь этого паводка и его опасных последствий.

Летом 2021 г. над территорией Крыма трижды складывалась такая синоптическая обстановка, которая вызвала выпадение обильных интенсивных осадков. Оставляя за рамками статьи подробный разбор синоптической ситуации, приводим характерные суммы осадков на метеостанциях в сравнении с данными многолетних наблюдений (табл. 1). Данные приведены по метеостанциям, расположенным на водосборах рассматриваемых рек.

Дожди с наибольшим слоем выпавших осадков прошли в июне. По данным метеостанций Керчь, Ялта, Ай-Петри, суммы осадков, выпавших 17.06.2021 и 18.06.2021, были соизмеримы с предыдущими максимумами за весь период наблюдений или даже превысили их. В результате этих осадков сформировались крупные паводки на реках Керченского п-ова и на реках района Ялты. На отдельных притоках рек Дерекойка и Учан-Су прошли сели.

В июле и августе осадки также были обильные, но не столь выдающиеся и имели более локальный характер.

По данным Крымского УГМС на метеостанции Ай-Петри слой осадков 04.07.2021 был в 3 раза меньше, чем в 18.06.2021. Несмотря на то, что метеостанция расположена в 2 км от границы водосбора р. Бельбек, эти осадки можно считать косвенным индикатором паводка на Бельбеке. Для лучшего понимания метеоусловий, сформировавших паводок в бассейне Бельбека, данные по метеостанции Ай-Петри дополнены данными наблюдений за осадками 04.07.2021 на гидрологических постах (ГП): Аромат — 98.2, Многоречье — 113.5, Куйбышево — 44.5 мм. Осадки на верхних притоках Бельбека (ГП Многоречье) были больше, чем на Коккозке (ГП Аромат) и в среднем течении Бельбека (ГП Куйбышево).

В августе зафиксированы обильные осадки по метеостанции Керчь. В течение шести дней (с 11.08.2021 по 16.08.2021) выпало ~200 мм осадков, наибольшие суточные слои осадков наблюдались 12.08.2021 и 13.08.2021. В результате сформировался второй за лето мощный паводок на реках района Керчи.

Что касается условий подстилающей поверхности, то перечисленные выше факторы — геология и рельеф, растительность и почвы — относительно стабильные величины для водосборов, и их влияние на формирование максимального стока однородно во времени. Для выяснения причин уникальности летних паводков 2021 г. по сравнению с предшествующими в ходе полевых работ проведены обследования водосборов рассматриваемых рек. На основе собранного материала сформулирован перечень местных факторов, которые могли вызвать локальные усиления негативных проявлений именно для паводков 2021 г. Большинство приведенных ниже факторов не влияет на формирование самой волны паводка, но на отдельных участках создает такие условия ее прохождения, которые могут значимо повысить характерные расходы и уровни воды, а также спровоцировать различные негативные

проявления, развитие опасных процессов. В перечень местных факторов включены перечисленные ниже.

1. Состояние русел рек. Полевые обследования и опросы местных жителей показали, что русла многих рек до прохождения паводков были сильно захламлены, особенно в пределах территорий населенных пунктов. Отсутствие регулярных расчисток русел от растительности, древесных заломов, мусора и донных отложений сильно снизило их пропускную способность, спровоцировав тем самым увеличение уровней затопления. На реках района Ялты дополнительная причина стеснения русел – скопления селевого материала, принесенного сверху в предшествующие паводку периоды.

2. Состояние верхних звеньев эрозионной сети. Обследование овражно-балочной сети в верховьях рассматриваемых рек, а также предоставленные местными специалистами данные мониторинга за предпаводковый период показали, что многие малые эрозионные формы (МЭФ) накануне прохождения паводка были сильно захламлены обломочным материалом. Наличие в областях формирования стока обширных скоплений обломочного материала может при прохождении паводка сформировать селевой паводок или сель и тем самым усугубить негативные последствия из-за громадной разрушительной силы селевого потока. Кроме того, обследования МЭФ и склонов показали обилие древесного лома по территории водосборов, который при отсутствии регулярных чисток мог спровоцировать формирование в МЭФ локальных завалов и подпруд, которые при выпадении обильных осадков могли быть прорваны, что увеличило волну паводка.

3. Предпаводковое состояние водосбора и гидрогеологические условия. Высокая степень увлажненности водосбора и наполненность подземных водоносных горизонтов из-за дождей в предшествующий паводку период могли также способствовать более резкому отклику гидрологической системы на выпавшие осадки. Анализ метеоусловий рассматриваемых районов в предпаводковый период 2021 г. показал, что паводкам июня предшествовал достаточно сухой, почти бездождевой период, а паводкам июля и августа предшествовали месяцы с повышенным по сравнению со среднегодовыми величинами количеством осадков.

4. Уровень моря, помимо синоптической обстановки, – немаловажный гидрометеорологический фактор формирования повышенных уровней воды в приустьевых участках рек. Для Керчи с учетом рельефа территории и малой длины водотоков, а также того, что были затоплены паводком именно прибрежные морские территории, можно предположить, что уровень моря сыграл определенную роль в формировании уровней за-

топления. Анализ отметок уровня моря в Керченском проливе за летний период показал, что июньский паводок совпал по времени со сгоном; в августе, наоборот, паводок пришелся на период повышенного уровня моря (нагона), что могло создать подпор и увеличить уровни затопления.

5. Состояние водохозяйственной инфраструктуры. В ходе полевых работ было обследовано более 100 гидротехнических сооружений (ГТС) в бассейнах рассматриваемых рек. Обследование показало, что далеко не все водопропускные сооружения по своим геометрическим параметрам пригодны для пропуска паводков такого масштаба, во многих створах сооружения забиты обломочным материалом. Часть из них могла стать локальными препятствиями, тем самым создавая подпор и увеличивая уровни и площади затопления на вышележащих участках. С другой стороны, некоторые сооружения находятся в неудовлетворительном состоянии и не способны выдержать напор волны паводка. Так, неудовлетворительное состояние плотин нескольких прудов в бассейне Бельбека и плотины пруда на р. Булганак в Керчи стало причиной частичного размыва тела плотин, тем самым увеличив расход воды паводков. Кроме того, в населенных пунктах отсутствуют или находятся в неудовлетворительном состоянии дренажные системы, ливневая канализация, что также вызывает затопления при выпадении обильных осадков. Отсутствие сооружений инженерной защиты, в том числе берегоукрепительных сооружений, также в значительной степени усугубляет негативное воздействие вод при прохождении паводков.

В каждом рассматриваемом районе набор факторов и соотношение степеней их воздействия имеет свои индивидуальные черты.

По результатам проведенного анализа факторов формирования паводков и их негативных последствий можно сделать следующие выводы.

Паводкам на реках района Керчи и Ялты 17–18 июня предшествовали уникальные метеорологические условия – суточные слои осадков были соизмеримы с абсолютными максимумами за период наблюдений или даже превысили их. Метеорологический фактор здесь можно считать абсолютно доминирующим. Это, конечно, не исключает влияния других, локальных факторов, усугубивших экстремальность паводков.

Паводки, прошедшие в бассейне р. Бельбек в июле и на реках района Керчи в августе, были сформированы в результате выпадения большого, но все же не уникального количества осадков. В формировании этих паводков, помимо метеорологического, очень важную роль сыграли факторы местного характера: локальные особенности водосборов рек, малой эрозионной сети, русел рек,

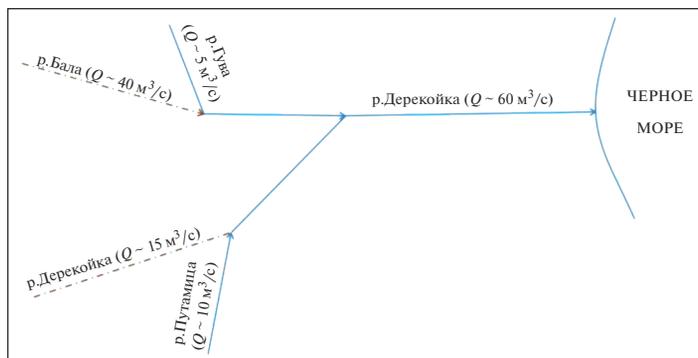


Рис. 3. Схема распространения паводка в бассейне р. Дерекойки 18.06.2021 (коричневый пунктир — селевой поток, голубая линия — водный поток).

ГТС, а в случае затопления Керчи — уровень моря.

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ И УРОВНЕЙ ВОДЫ ПАВОДКОВ 2021 г.

Для анализа процессов формирования и распространения паводочной волны в сентябре 2021 г. был проведен комплекс полевых топографо-геодезических и гидрометрических работ на заранее намеченных створах вдоль всех исследуемых водотоков. Всего работы проведены на 64 створах: 12 створов на реках района Керчи, 18 — на реках в районе Ялты, 34 — в бассейне р. Бельбек.

Работы на гидрометрических створах включали в себя съемку поперечного профиля долины до незатопляемых отметок, измерение продольного уклона водной поверхности, измерение текущего расхода воды, съемку абсолютных высот отметки текущего уреза воды и максимального уровня воды прошедшего паводка (по меткам высоких вод), фотографирование и описание русла и берегов реки.

Полученные в ходе полевых работ материалы использованы для расчета максимальных расходов воды прошедших паводков. Расходы воды, соответствующие зафиксированным отметкам уровней высоких вод, определены в расчетных гидрометрических створах по кривой $Q = f(H)$ с использованием ПО Profiles2010 [19]. Рассчитанные значения расходов являются оценочными из-за неопределенностей, возникающих в процессе расчета, а также из-за наличия ряда возможных источников ошибок в исходных данных.

Для большей надежности расчеты проведены на большом количестве створов, что дало возможность поверять результаты путем сравнения рассчитанных величин по соседним створам, анализировать возможные причины расхождения значений и отбрасывать недостоверные значения.

Для тех створов, на которых ведутся наблюдения на гидрологических постах, достоверность результатов проведенных расчетов проверялась сравнением расчетных значений с аналогичными величинами, предоставленными Крымским УГМС по запросу ИВП РАН.

На реках района Керчи экстремальные паводки сформировались за это лето дважды — 17–18 июня и 12–13 августа. Проводился единый расчет максимальных расходов воды по найденным меткам высоких вод. Максимальные расходы воды паводков 2021 г. на реках района Керчи оцениваются так: 60 м³/с на Мелек-Чесме, 60 м³/с на Катерлезе и 65 м³/с на Булганаке.

Результаты обследований на реках района Ялты показали, что на части водотоков в июне 2021 г. прошел сель, вызванный паводком. На рис. 3 приведена построенная по результатам расчетов схема прохождения паводка в бассейне р. Дерекойки 18.06.2021 с указанием типа потока (водный/селевой). По рекам Бале и Дерекойке прошли мощные сели. Большая часть принесенного селевого материала полностью задержалась на территории микрорайона Васильевка, а до города дошел уже не сель, а паводок.

В бассейне р. Учан-Су прошедший паводок также имел смешанные черты. Паводок сформировался на трех основных водотоках — собственно Учан-Су, ее правом притоке Барбале и левом притоке Яузларе. Результаты обследований показали, что на первых двух прошел водный паводок, на Яузларе — сель. К городу поток подошел уже в едином русле и, скорее всего, имел черты селевого паводка. Максимальный расход воды в р. Учан-Су после соединения с притоками оценивается в 50–55 м³/с. Расчеты на нижних створах показали, что к устью реки расход воды еще несколько увеличился за счет бокового притока и составил 70–75 м³/с.

Сравнение рассчитанных максимальных расходов воды паводков на реках Дерекойке и Учан-

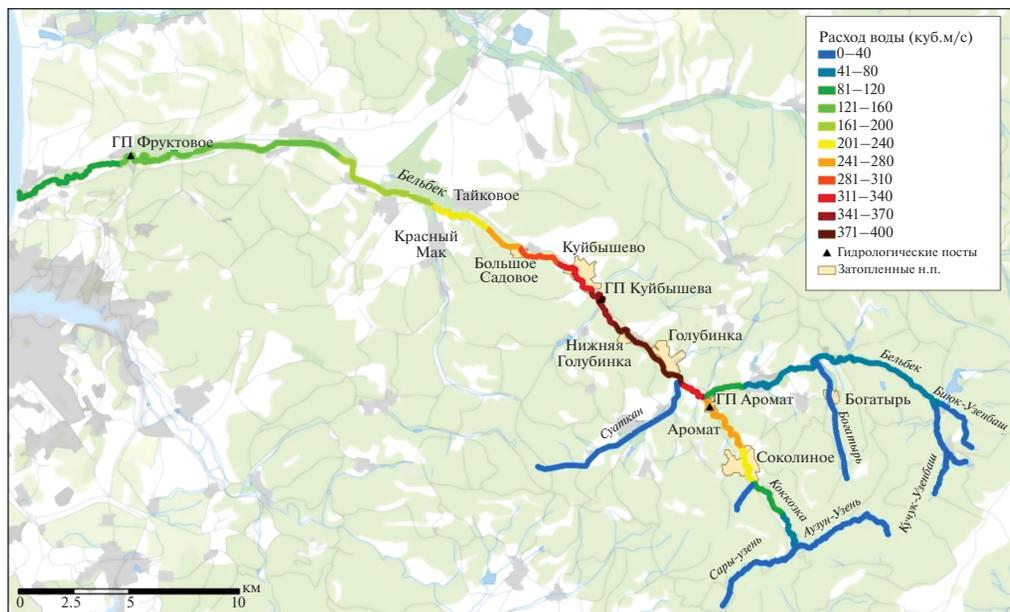


Рис. 4. Процесс трансформации волны паводка в бассейне р. Бельбек – максимальные расходы воды на пике паводка 4–5 июля 2021 г.

Су с аналогичными величинами, предоставленными Крымским УГМС, показало некоторое завышение рассчитанных расходов по отношению к данным УГМС. Расход воды Дерекойки в створе ГП г. Ялта по данным УГМС составил $48 \text{ м}^3/\text{с}$, по расчетам $\sim 60 \text{ м}^3/\text{с}$, расход воды Учан-Су в створе ГП г. Ялта по данным УГМС – $43 \text{ м}^3/\text{с}$, по расчетам – $50\text{--}55 \text{ м}^3/\text{с}$. Учитывая сложность объекта и все неопределенности расчета, имеющие расхождения представляются допустимыми.

Для бассейна р. Бельбек рассчитанные значения максимальных расходов воды в створах гидрологических постов также несколько выше, чем значения максимальных расходов в этих же створах по данным УГМС. Так, на ГП р. Коккозка – с. Аромат максимальный расход по данным поста составляет $219 \text{ м}^3/\text{с}$, по результатам расчета данного исследования – $240 \text{ м}^3/\text{с}$, на ГП р. Бельбек – пгт Куйбышево – 329 и $360 \text{ м}^3/\text{с}$, на ГП р. Бельбек – с. Фруктовое – 114 и $125 \text{ м}^3/\text{с}$. Удовлетворительные результаты сравнения позволяют с доверием относиться и к результатам расчетов расходов во всех других створах.

На основе полученных значений максимальных расходов воды на 34 створах на р. Бельбек и ее притоках проведен анализ распространения паводка. Графически этот процесс отображен на рис. 4 и 5.

Анализ результатов позволил выделить несколько створов, значения расходов по которым выбиваются из общей тенденции (рис. 5), а потому вызывают сомнения. При дальнейшем анали-

зе величины расходов по этим створам не учитывались.

Зафиксирована последовательная трансформация максимальных расходов воды по длине реки. Основная волна паводка сформировалась в бассейне левого притока р. Бельбек – р. Коккозка. На Коккозке паводок был сформирован не только по ее двум основным притокам – рекам Сары-Узень и Аузун-Узень, но также и за счет мощного бокового притока по балкам и оврагам. В месте слияния Сары-Узень и Аузун-Узень максимальный расход воды Коккозки оценивается в $\sim 80 \text{ м}^3/\text{с}$. Ниже по течению после приема воды ряда притоков (в том числе селевых) расход постепенно увеличивается и к устью достигает $\sim 240 \text{ м}^3/\text{с}$.

На Бельбеке выше впадения Коккозки расход воды был в несколько раз меньше, чем в Коккозке. По оценкам данного исследования, в верхнем течении р. Бельбек после соединения рек Кучук-Узенбаш, Биюк-Узенбаш и Манаготры расход воды составлял $40\text{--}50 \text{ м}^3/\text{с}$. Далее вниз по течению расход постепенно увеличивался за счет бокового притока и к месту впадения Коккозки составлял $\sim 90 \text{ м}^3/\text{с}$.

После впадения в Бельбек притоков Коккозки и Суаткана расход воды в Бельбеке достиг своего максимума – $380\text{--}390 \text{ м}^3/\text{с}$.

На участке р. Бельбек от с. Голубинка до пгт Куйбышево расход воды меняется не сильно – уменьшается с 390 до $350 \text{ м}^3/\text{с}$. Ниже Куйбышево начинается значительное уменьшение расхода воды. На отрезке между Куйбышево и дорогой,

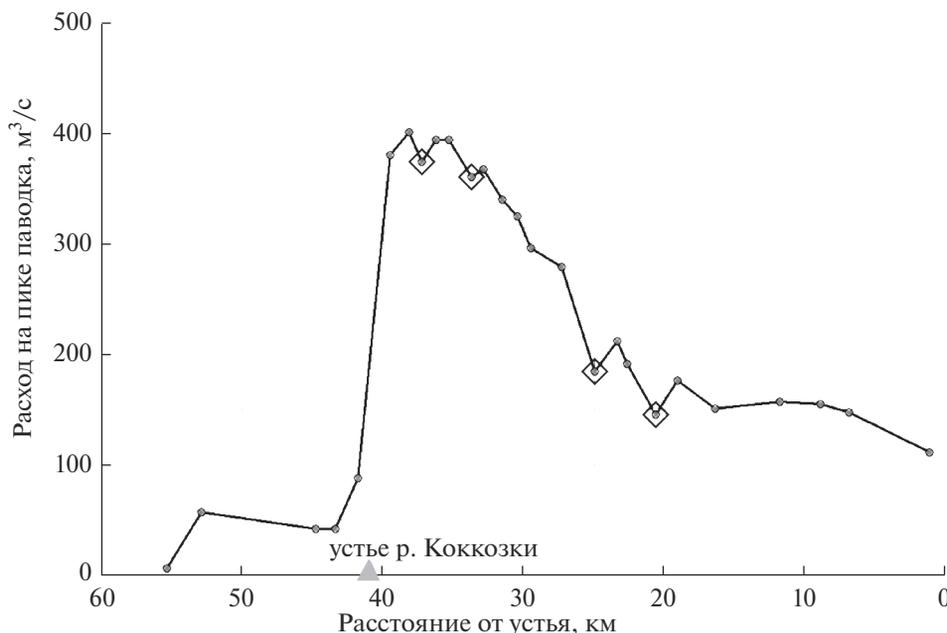


Рис. 5. Продольное распределение максимальных расходов воды паводка на р. Бельбек (ромбами выделены створы, результаты расчета по которым выбиваются из общей тенденции).

соединяющей села Танковое и Красный Мак, расход воды в Бельбеке понижается с 350 до 200 м³/с.

Обследование реки показало, что, действительно, на этом участке значительная часть паводка ушла на правый берег. Левый берег реки на этом участке скальный, очень высокий и крутой, а правый берег — широкая плоская равнина, занятая сельхозугодиями, преимущественно фруктовыми садами. Русло реки глубокое, имеет большую пропускную способность. Оно отделено от территории садов искусственным валом, однако этот вал не везде имеет достаточную высоту, чтобы удержать паводочную волну в русле. На тех участках, где в вале имеются понижения или прораны, во время прохождения пика паводка вода протекала через них, растекаясь по обширным пространствам на правом берегу, что подтверждается зафиксированными метками высоких вод.

Плоскостной поток по правому берегу дошел до дороги, соединяющей села Танковое и Красный Мак, насыпь которой сработала дамбой и задержала его дальнейшее продвижение (рис. 6). Так был срезан пик паводка на этом участке.

Ниже по течению продолжался процесс распластывания паводка, максимальный расход снижался по длине реки, но уже менее интенсивно. Если на 7-километровом участке между пгт Куйбышево и с. Танковым расход снизился с 350 до 200 м³/с, то на нижележащем 20-километровом участке от с. Танкового до устья он уменьшился с 200 до 110 м³/с.

ОЦЕНКА ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ ПАВОДКОВ 2021 г.

Для оценки экстремальности прошедших паводков проведено сравнение максимальных расходов и уровней воды в 2021 г. с максимальными расходами и уровнями воды на исследуемых реках за предшествующий период. В качестве информации использованы данные наблюдений на ГП Крымского УГМС [1, 8, 9, 33–35] и материалы публикаций [7, 12, 16, 24–26, 31]. Для анализа использовались ряды максимальных годовых расходов воды, а также отдельно ряды максимальных расходов воды паводков теплого периода, так как различный генезис паводков холодного и теплого периодов в Крыму требует отдельного статистического анализа расходов этих паводков [24, 25, 33].

На реках района Керчи в настоящее время гидрологических постов нет, данные наблюдений отсутствуют. В работе [31] приведены расчетные значения 1%-го расхода воды для рек Мелек-Чесме, Катерлез и Булганак, посчитанные авторами статьи по формуле предельной интенсивности стока. Сравнение данных статьи и рассчитанных расходов в 2021 г. приведено в табл. 2.

Сопоставление максимальных расходов воды на реках Учан-Су и Дерекойке в створе гидрологических постов в Ялте во время паводка в 2021 г. с данными наблюдений за предшествующий период приведено в табл. 3. Расход воды на р. Учан-Су превысил предыдущий наблюдаемый максимум на 30%. На р. Дерекойке расход воды на 16% превысил предыдущий наблюдаемый годовой



Рис. 6. Река Бельбек и ее правый берег во время прохождения паводка 04.07.2021 г.

максимум и на 110% – максимум теплого периода.

Сопоставление наблюдаемых летом 2021 г. расходов воды с расчетными величинами максимального расхода воды редкой повторяемости, согласно [16], показывает, что расход воды на обеих реках в июне 2021 г. был соизмерим с расходом 1%-й обеспеченности или превысил его.

Для сопоставления максимальных расходов воды паводков в бассейне р. Бельбек за 2021 г. и за предшествующий период проведен статистический анализ рядов максимальных расходов воды за период наблюдений до 2019 г. По данным наблюдений на ГП Аромат, Куйбышево и Фруктовое проведен статистический анализ рядов: проверка рядов на однородность и стационарность, оценка статистических параметров, построение аналитических кривых обеспеченности, расчет значений квантилей 0.1- и 1%-й обеспеченности. Гидрологические расчеты проведены в соответствии с действующими нормативными документами [23, 37]. Эмпирические кривые обеспеченности максимальных расходов воды на реках Крыма, как правило, имеют повышенную асимметричность, поэтому для их сглаживания и экстраполяции рекомендуется логарифмически нормальная кривая распределения [16, 33]. Сравнение полученных значений квантилей 0.1%-й и 1%-й обеспеченности с аналогичными оценками в [16, 33] показало высокую сходимость результатов.

В табл. 4 приведено сравнение максимальных расходов воды в 2021 г. с предыдущими наблюдаемыми максимумами расходов, а также с максимальными расходами воды 0.1%-й и 1%-й обеспеченности, рассчитанными по данным за предшествующий период наблюдений (до 2019 г.). Приведенные результаты показывают разную

значимость прошедшего в 2021 г. паводка в разных частях бассейна.

Для ГП Аромат паводок 2021 г. – совершенно уникальный. Максимальный уровень воды в 2021 г. на пике паводка превысил предыдущий максимум на 1 м. Уникальность паводка наглядно демонстрирует приведенный на рис. 7 график максимальных расходов воды за период наблюдений. Расход воды превысил предыдущий максимум в 3 раза и в >10 раз превысил среднемноголетнее значение этой характеристики. Также прошедший расход воды был выше имеющихся оценок максимальных расходов воды 0.1%-й и 1%-й обеспеченности, рассчитанных по данным за предыдущий период наблюдений; т. е. наблюдаемый в 2021 г. расход воды в рамках предшествующих оценок максимального стока имеет повторяемость реже, чем раз в 1000 лет, что, безусловно, указывает на необходимость пересмотра и уточнения статистических параметров максимального стока с учетом данных наблюдений 2021 г.

На ГП Куйбышево расход воды паводка превысил предыдущий максимум в 1.5 раза, предыдущий максимум уровня был превышен на 44 см. Если сравнивать наблюдаемый расход воды со значениями квантилей различной обеспеченно-

Таблица 2. Сравнение максимальных расходов воды Q паводков 2021 г. с максимальными расходами воды 1%-й обеспеченности по [31] для рек района Керчи

Река	$Q_{1\%}$ по [31], м ³ /с	Q_{\max} 2021 г., м ³ /с
Мелек-Чесме	57.18	60.0
Катерлез	59.45	60.0
Булганак	29.97	65.0

Таблица 3. Сравнение максимальных расходов воды паводка 2021 г. с данными наблюдений на ГП на реках района Ялты ($\text{м}^3/\text{с}$)

Гидрологический пост	Расход воды на пике паводка 18.06.2021	Предыдущий максимальный расход (дата)		Расчетные значения максимальных расходов воды редкой повторяемости по [16]	
		год	теплый период	1%	0.1%
ГП р. Учан-Су – г. Ялта	43.0	33.1 (10.01.1967)	н.д.	44.9	101
ГП р. Дерекойка – г. Ялта	48.1	41.3 (17.12.1962)	22.8 (10.06.1949)	43.5	98.0

Таблица 4. Сравнение максимальных расходов воды паводка 2021 г. с данными наблюдений на ГП в бассейне р. Бельбек ($\text{м}^3/\text{с}$)

Гидрологический пост	Расход воды на пике паводка 4–5 июля 2021 г.	Предыдущий максимальный расход (дата)		Расчетные значения максимальных расходов воды редкой повторяемости (по данным наблюдений до 2019 г.)	
		год	теплый период	1%	0.1%
ГП р. Коккозка – Аромат	219	78.2 (14.12.1981)	68.3 (17.10.1981)	106	195
ГП р. Бельбек – Куйбышево	329	295 (14.12.1981)	218 (21.06.1941)	250	482
ГП р. Бельбек – Фруктовое	113	414 (14.12.1981)	137 (27.04.1969)	148	414

сти, оцененными по данным за предшествующий период, то его величина соответствует квантилю 0.4%-й обеспеченности (расходу, проходящему 1 раз в 250 лет). Паводок был уникальным, но попал в диапазон расходов воды редкой повторяемости. Учет наблюденного в 2021 г. расхода в оценке статистических параметров максимального стока так же, как и для ГП Аромат, в дальнейшем значительно скорректирует величины квантилей редкой повторяемости.

На ГП Фруктовое паводок был высокий, но не уникальный, предыдущие максимумы уровней и расходов воды не были превышены. Расход воды паводка соответствует величине квантиля 4.6%-й обеспеченности (по оценкам за предыдущий период наблюдений).

Сравнение июльского паводка с шестью предыдущими самыми крупными паводками на Бельбеке (1941, 1962, 1969, 1981, 1983, 1987 гг.) показало, что среди прочих паводок 2021 г. выделяется уникальным значением отношения срочного максимального расхода к среднесуточному максимальному расходу. Это соотношение, отражающее дружность прохождения паводка, ранее

оставалось относительно стабильным и составляло от 1.5 до 2.5 для предыдущих крупных паводков. В 2021 г. оно достигло 5.1 для ГП Аромат и 6.0 для ГП Куйбышево. Это выделяет паводок 2021 г. из общего ряда и, по всей видимости, может служить подтверждением сделанного предположения, что паводок имел отчасти черты волны прорыва. Это предположение подтверждают и опросы местных жителей, показавшие, что повсеместно отмечалось крайне непродолжительное стояние максимальных уровней во время паводка (от 20 мин до 1 ч). Так как крупных прудов в бассейне Коккозки нет, то принято, что на Коккозке имел место прорыв естественно сформированной запруды (скорее всего завал из деревьев) на одном из верхних звеньев эрозионной сети. Поскольку прорыв произошел после выпадения большого количества осадков, то волна прорыва на одном из притоков наложилась на волны паводков, проходящих одновременно на остальных притоках, что и сформировало уникальный расход воды в р. Коккозке.

Приведенные материалы демонстрируют уникальность паводка 2021 г. и ставят вопрос о необ-

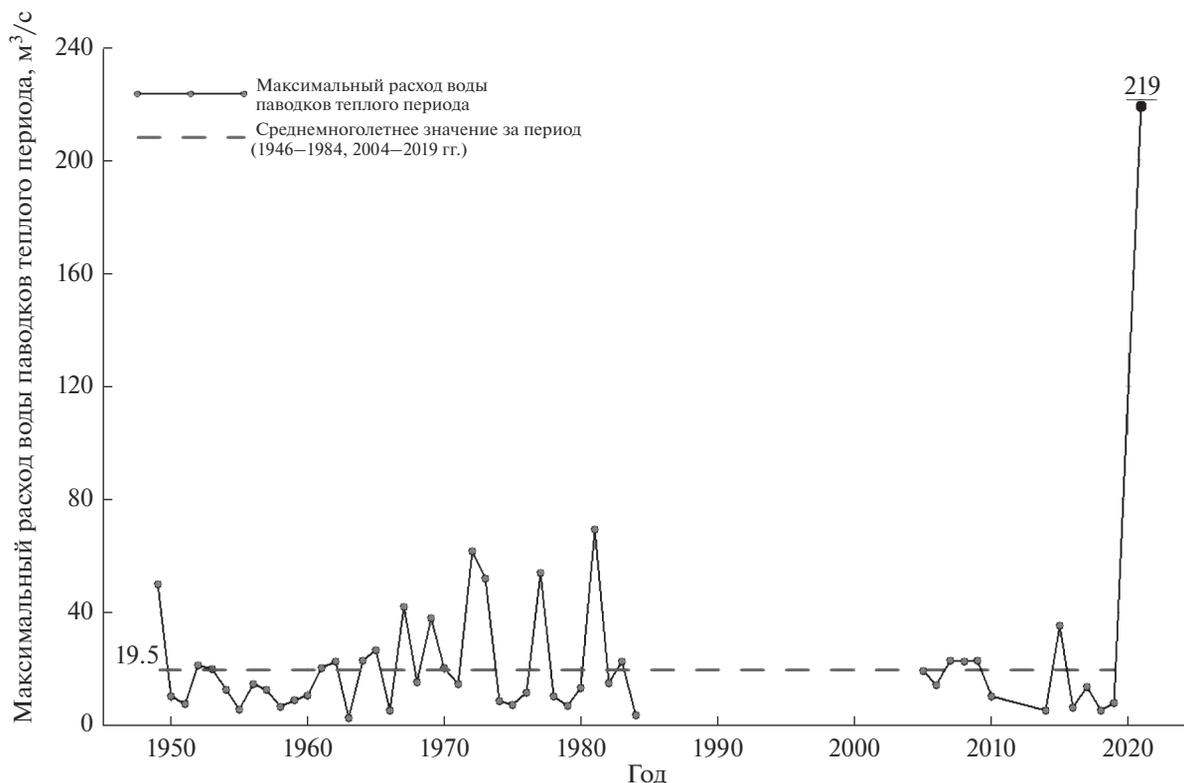


Рис. 7. Максимальный расход воды паводков теплого периода по ГП р. Коккозка – с. Аромат за период наблюдений (1949–1984, 2005–2021 г.).

ходимости корректировки статистических оценок максимального стока в бассейне р. Бельбек с учетом вновь полученных данных. Несмотря на различную значимость прошедшего паводка для разных частей бассейна, представляется очевидным, что для всех ГП наблюдаемый летом 2021 г. расход воды в той или иной степени повлияет на имеющиеся представления о максимальном стоке, сформированные на основе данных наблюдений за предшествующий период. В связи с особым генезисом паводка 2021 г. остается открытым вопрос о том, как следует учитывать наблюдаемые в 2021 г. расходы воды в ряду максимальных расходов. Этот вопрос может стать темой отдельного научного исследования.

НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПАВОДКОВ 2021 г.

Для оценки опасных проявлений эрозионных и русловых процессов, спровоцированных паводком, а также негативного воздействия вод и селевых потоков в ходе выполнения полевых работ проведено обследование рек и прибрежных территорий в населенных пунктах. Масштабы негативного воздействия в городах Керчи и Ялте и в населенных пунктах на территории бассейна р. Бельбек представлены на рис. 8. Приведенные

карты демонстрируют повсеместную активизацию опасных эрозионных и русловых процессов с серьезными негативными последствиями. Основные виды выявленного негативного воздействия следующие:

- затопление территорий сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов: жилых кварталов, промышленных объектов, объектов транспортной и инженерной инфраструктуры, объектов рекреации, административных, образовательных, медицинских учреждений;

- причинение ущерба движимому и недвижимому имуществу населения: несколько смытых домов, десятки разрушенных заборов, смытых хозяйственных построек, унесенных потоком машин;

- нарушение путей сообщения между населенными пунктами, временный выход из строя систем инженерных коммуникаций;

- захламливание территорий населенных пунктов обломочным материалом, древесным и бытовым мусором, принесенным паводком или селем;

- частичное или полное нарушение пропускной способности русел вследствие завала их обломочным материалом или древесным мусором, принесенным паводком или селем;

- полное или частичное разрушение ГТС, в том числе плотин прудов и мостов из-за активизации

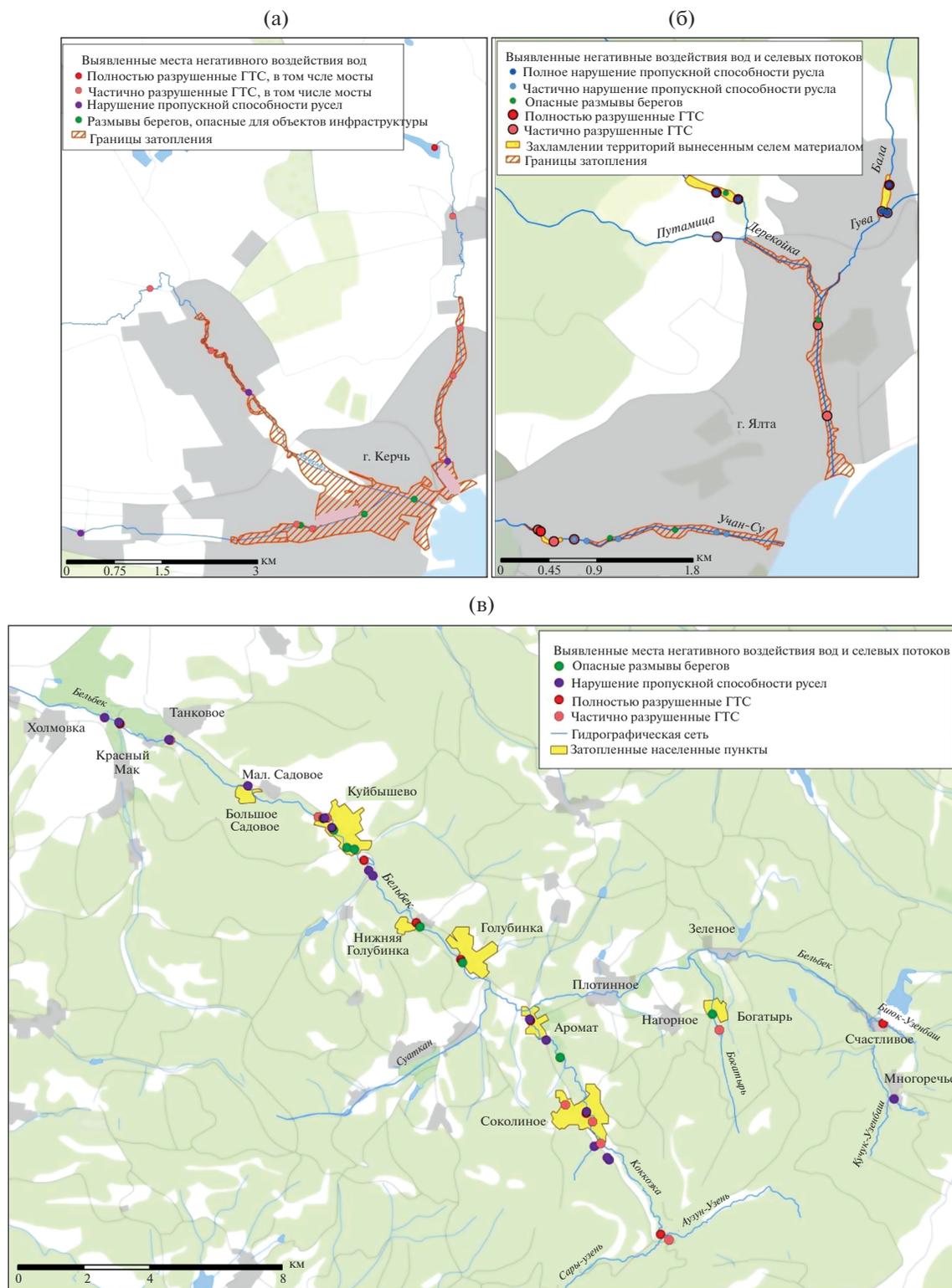


Рис. 8. Выявленные места негативного воздействия вод и селевых потоков: а – г. Керчь; б – г. Ялта; в – бассейн р. Бельбек.

эрозионной деятельности и разрушительной силы паводочной волны;

размыты берегов рек, представляющие опасность для объектов инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование условий формирования, особенностей прохождения и последствий экстремальных гидрологических явлений на реках Крыма летом 2021 г.

Анализ причин формирования паводков показал, что они произошли в результате совокупного действия различных факторов, главный из которых — метеорологический. Местные условия в некоторых случаях в значительной степени усугубили влияние метеорологического фактора.

Результаты исследования показали уникальность прошедших паводков по всем исследуемым объектам. Общее для всех объектов — превышение в ходе паводков 2021 г. предыдущих зафиксированных максимумов расходов воды, а также обилие и разнообразие негативных последствий для населения и объектов инфраструктуры. Показано, что зафиксированные в 2021 г. величины расходов и уровней могут существенным образом повлиять на расчетные значения этих величин редкой повторяемости.

Прошедшие паводки вызвали опасные эрозионные процессы и имели ряд существенных негативных последствий. Для предотвращения аналогичных явлений и/или минимизации их негативных последствий в будущем предлагается действовать в двух направлениях:

изучать и прогнозировать те природные факторы, на которые невозможно повлиять;

осуществлять превентивные меры непосредственно на реках и их водосборах для минимизации последствий паводков.

Представляется крайне важным изучение и прогнозирование метеорологических факторов формирования экстремальных явлений. Аномальность метеоусловий, приведших к формированию паводков летом 2021 г., может быть сигналом увеличения нестабильности климата. Поэтому следует обратить пристальное внимание на влияние изменений климата на экстремальные гидрологические явления в Крыму.

Все более важное значение в решении этих вопросов приобретают методы моделирования, совмещения моделей циркуляции атмосферы с моделями формирования стока и гидродинамическими моделями [14, 15, 42]. Создание подобных региональных моделей для водных объектов Крыма может стать необходимым инструментом краткосрочного прогнозирования экстремальных гидрологических явлений и оценки рисков наводнений в условиях меняющегося климата.

Не менее значима задача предотвращения негативных последствий “на местах” — на самих реках и на их водосборах. Подготовка и проведение ряда превентивных мер, позволяющих при формировании экстремальных гидрологических яв-

лений избегать серьезных негативных последствий, — важный шаг на пути к повышению водной безопасности Крыма в будущем.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Охременко (Крымское УГМС) за ценные советы в планировании полевых работ и помощь в оценке причин и последствий прошедших экстремальных явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 18.09.2021)
2. Архив ежедневных данных по осадкам KNMI Climate Explorer. <http://climexp.knmi.nl/start.cgi> (дата обращения 29.10.2021)
3. *Багров Н.В., Вахрушев Б.А.* К вопросу об активизации неблагоприятных природных процессов в Крыму в начале XXI века // Изменения состояния окружающей среды в странах содружества в условиях текущего изменения климата. М.: Медиа-Пресс, 2008. 232 с.
4. *Багрова Л.А., Смирнов В.О., Гунькина И.Ю., Змерзлая К.С.* Опасные природные явления в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2013. Т. 9. Вып. 2. Ч. 1. С. 115–126.
5. *Величко Б.Л.* Селевые потоки и мероприятия по борьбе с ними в Крыму. Автореф. дис. ... канд. сел.-хоз. наук. Харьков: Харьковский сельскохозяйственный ин-т, 1964. 24 с.
6. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2003. 352 с.
7. *Гопченко Е.Д., Овчарук В.А., Тодорова Е.И.* Максимальный сток дождевых паводков рек Горного Крыма // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2014. Вип. 17. С. 133–140.
8. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. II. Украинская ССР. Вып. 3. Бассейн Северского Донца, рек Крыма и Приазовья. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
9. Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики (за 1971–1975 гг. и весь период наблюдений). Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
10. *Данилов А.Н.* Риски чрезвычайных ситуаций природного характера на территории Республики Крым // XX Международн. науч.-практ. конф. по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций “Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий”. Тез. докл. М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. С. 201–205.
11. Ежегодные доклады Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым “О состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым” за 2013–2020 гг.

12. *Ескин В.М., Кузьминых А.Ю.* Сток рек Крыма // Вестник молодых ученых ПГНИУ. Сб. науч. тр. / Под ред. *Р.Р. Гильмутдинова*. Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т, 2016. Вып. 6. С. 12–17.
13. *Жук В.О.* Методика оценки потенциальной гидрометеорологической опасности территории Крымского полуострова. Дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж: Таврическая акад. КФУ, 2021.
14. *Иванов В.А., Овчаренко И.А., Прусов А.В., Шокуров М.В.* Моделирование катастрофических паводков в регионе Южного берега Крыма // Докл. Нац. акад. наук Украины. 2012. № 8. С. 79–84.
15. *Иванов В.А., Краевский К.Е., Лемешко Е.М., Прусов А.В., Шокуров М.В.* Реконструкция события экстремального паводка в регионе Южного Берега Крыма // Процессы в геосредах. 2017. № 2 (11). С. 503–510.
16. Климат и опасные гидрометеорологические явления в Крыму / Под ред. *К.Т. Логвинова, М.Б. Барабаш*. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 318 с.
17. *Клюкин А.А.* Экзогеодинамика Крыма. Симферополь: Таврия, 2007. 320 с.
18. *Клюкин А.А.* Экстремальные проявления неблагоприятных и опасных экзогенных процессов в XX веке в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 1. С. 27–38.
19. *Кокорев А.В.* Программа выполнения расчетов по данным промеров и геодезической съемки морфопрофилей русла реки и затопляемой части речной долины Profiles 2010. Руководство пользователя. Валдай, 2010.
20. *Верескун А.В., Файзулин Т.Ш., Олтян И.Ю.* Крым. Комплексное исследование влияния рисков природных и техногенных чрезвычайных ситуаций на безопасность жизнедеятельности населения Республики Крым и г. Севастополя. М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015.
21. *Куксина Л.В., Голосов В.Н., Жданова Е.Ю., Цыпленков А.С.* Гидролого-климатические факторы формирования экстремальных эрозионных событий в горном Крыму // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2021. № 5. С. 36–50.
22. *Лущик А.В., Горбатюк Н.В., Лущик М.А.* Сели Крыма. Исследования и селезащита // Гидротехника. 2016. № 3. С. 68–71.
23. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным / Под ред. *Рождественского А.В., Лобановой А.Г.* СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.
24. *Мырза Е.Л., Овчарук В.А.* Анализ условий формирования паводков холодного периода на реках Крымских гор // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 740–745.
25. *Овчарук В.А., Прокофьев О.М., Тодорова О.И.* Особенности формирования паводков теплого периода на реках Горного Крыма // Вестн. Харьковского ун-та. № 1157. Сер. Геология. География. Экология. 2015. Вып. 4. С. 99–106.
26. *Овчарук В.А., Тодорова Е.И.* Статистические параметры максимальных расходов воды и слоев паводочного стока для рек горного Крыма // Геополитика и экогеодинамика региона. Симферополь: КНЦ, 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 766–770.
27. *Олиферов А.Н.* О селевых паводках в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 2. С. 67–72.
28. *Олиферов А.Н.* Селевые потоки в Крыму в XXI веке // Геополитика и экогеодинамика региона. Симферополь: КНЦ, 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 299–303.
29. *Олиферов А.Н.* Селевые явления в Крыму как чрезвычайные экологические ситуации // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 1. С. 39–46.
30. *Олиферов А.Н., Тимченко З.В.* Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с.
31. *Рабешко С.М., Ступаченко Ю.В.* Гидрологическое обоснование необходимости защиты г. Керчь от паводков // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. тр. Симферополь: Нац. акад. природоохран. курорт. стр-ва, 2007. Вып. 18. С. 195–198.
32. Расписание погоды. <https://gp5.ru> (дата обращения: 26.10.2021)
33. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 344 с.
34. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
35. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеоиздат, 1964.
36. *Самохина О.Ф., Кононова Н.К.* Роль циркуляции атмосферы в повторяемости наводнений в России в 2012–2018 гг. // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск: ИГУ, 2019. С. 341–349.
37. СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик.
38. Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке – начале XXI века / Под ред. *В.А. Бокова*. Симферополь: ДОЛЯ, 2010. 304 с.
39. Трансформация структуры водного баланса в Крыму в XX веке – начале XXI века и ее оптимизация / Под ред. *В.А. Бокова*. Симферополь: Крымский НЦ, 2011. 227 с.
40. *Турега О.Н.* Геологическое строение приустьевой части долины речки Мелек-Чесме // Культура народов Причерноморья. 2003. № 46. С. 30–32.
41. *Устойчивый Крым.* Водные ресурсы. Симферополь: Таврида, 2003. 413 с.
42. *Blöschl G., Kiss A., Viglione A. et al.* Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years // Nature 583. 2020. P. 560–566 <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3>
43. *Glaser R., Riemann D., Schönbein J., Barriendos M., Brazdil R., Bertolin C., Camuffo D., Deutsch M., Dobrovolný P., van Engelen A.* The variability of European floods since AD1500 // Climatic Change. 2010. V. 101. P. 235–256. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9816-7>

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 556.3;550.46;551.50

**ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИРОДНЫХ ВОД
ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА¹**

© 2022 г. Н. А. Харитонов^{a, b, *}, Е. А. Филимонова^a, Е. А. Картунов^a,
В. Н. Самарцев^a, Е. В. Дробязко^a, Я. В. Сорокоумова^a, М. Г. Гречушников^{a, c},
А. Л. Прошкина^a, С. П. Поздняков^a

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^bДальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, 690022 Россия

^cИнститут водных проблем, Москва, 119333 Россия

*e-mail: tchenat@mail.ru

Поступила в редакцию 14.01.2022 г.

После доработки 14.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Полученные результаты показывают, что природные воды юго-западной части Крымского п-ова характеризуются широким спектром химического и изотопного состава. Химический состав вод, а также уровень концентрации солевой компоненты обусловлены и контролируются рядом факторов: тектоническим строением территории, литологическим составом водовмещающих толщ, а также интенсивностью и длительностью их растворения. Общее содержание редкоземельных элементов мало (до 0.199 мкг/л): максимальная концентрация обнаружена в родниках, локализованных в мел-палеогеновых толщах, минимальная – в подземных водах скважин. Повсеместно количество легких редкоземельных элементов значительно больше, чем иттрия и тяжелых редкоземельных элементов. NASC-нормализованные тренды распределения редкоземельных элементов достаточно пологи, что типично для пресных подземных вод, в них отчетливо проявляется положительная аномалия Eu и отрицательная аномалия Ce, исключая воды из скважин. Подземные воды родников по значениям $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ близки к атмосферным водам региона, в то время как пробы подземных вод из скважин имеют сильно облегченный состав. Установлено, что воды родников имеют метеорный генезис с преимущественно зимним питанием на высотных отметках 800–1200 м.

Ключевые слова: природные воды, химический состав, микрокомпоненты, $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$, редкоземельные элементы, юго-западный Крым.

DOI: 10.31857/S0321059622040095

ВВЕДЕНИЕ

Крым – один из наиболее вододефицитных регионов Российской Федерации, для которого устойчивое хозяйственно-питьевое водоснабжение – базис экономического и рекреационного развития. В силу сложившихся политических обстоятельств решение этой проблемы может опираться преимущественно на использование ресурсов природных поверхностных и подземных вод, которые формируются в пределах полуострова. Климатическая и высотная зональность наряду с особенностями геологического строения на территории полуострова приводит к тому, что зона формирования водных ресурсов локализована в основном в Горном Крыму, что осложняет водоснабжение в равнинном Крыму и в курортных

прибрежных районах. Ресурсы поверхностных и подземных вод находятся в теснейшей взаимосвязи, причем характер этой связи во многом определяется изменчивостью тектонического строения, литологического состава пород и гидрогеологических условий. Обусловленный климатическими условиями дефицит водных ресурсов усугубляется их качеством, зачастую несоответствующим нормам хозяйственно-питьевого водоснабжения. Несмотря на то, что в целом изучение гидрологических и гидрогеологических условий Крыма проводится более ста лет, а в советский период в рамках фундаментального обобщения региональной гидрогеологии страны был выпущен отдельный том “Гидрогеологии СССР” [3], посвященный Крымскому п-ову, – процессы формирования макро- и микроэлемента, а также изотопного состава природных вод полуострова нуждаются в дальнейшем изучении. Перспективный метод такого исследования –

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0126–2021–0001, государственная регистрация 121040700170–9).

проведение и интерпретация результатов гидрохимического и изотопного опробования воднобалансового замкнутого региона полуострова, включающего в себя и зону формирования водных ресурсов в Горном Крыму, и зону транзита, и прибрежную зону разгрузки потоков поверхностных и подземных вод. В качестве такого региона в настоящей статье выбран юго-западный Крым. Основная цель данной работы заключается в выявлении условий формирования природных вод юго-западной части Крымского п-ова и в оценке вклада различных источников в формирование солевого состава изучаемых водных объектов.

Район исследований включает в себя Альминскую впадину и прилегающую область ее питания за счет подземных вод Горного Крыма. Территория объединяет бассейны рек северо-западного склона Крымских гор: Черной, Бельбек, Качи, Альмы и Западного Булганака (рис. 1). Реки северо-западных склонов Крымских гор – самые многоводные, на них построено семь водохранилищ, включая открытое в 2021 г. Бельбекское водохранилище и самое крупное в Крыму Чернореченское. Их водные ресурсы используются как для питьевого водоснабжения, так и для орошения; кроме того, часть воды перебрасывается на южный берег Крыма (ЮБК). Таким образом, рассматриваемые речные бассейны – одни из наиболее значимых для Крымского п-ова.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Изучаемая территория расположена на двух основных тектонических структурах Крымского п-ова: Скифской плите и складчатой области Горного Крыма. Граница между Степным и Горным Крымом проходит по выделенной В.В. Юдиным Предгорной мезозойской структуре/шву, часто именуемой Симферопольским разломом или Лозовской зоной смятия субширотного простирания [8]. В районе исследования встречаются все геологические породы Крыма: от самых древних пород таврической серии до самых молодых сарматских.

Согласно современному гидрогеологическому районированию, рассматриваемая территория относится к Альминскому артезианскому бассейну (АБ) и Крымской сложной гидрогеологической складчатой области (СГСО) [11]. В Горном Крыму трещинно-карстовые и трещинные воды приурочены к тектоническим структурам и имеют пластово-блочный характер, в Равнинном Крыму подземные воды приурочены к моноклиальной структуре и формируют межпластовые воды. В гидрогеологическом разрезе территории выделены следующие основные водоносные комплексы: четвертичный, неогеновый, палеогеновый, меловой, верхнеюрский; водоносные зоны:

мезозойская экзогенной трещиноватости и кайнозойско-мезозойская эндогенной трещиноватости (рис. 1). Каждый из вышеперечисленных водоносных комплексов объединяет несколько гидрогеологических подразделений разной степени водоносности, которые в пределах площади распространения основного водоносного комплекса или образуют единую водоносную систему на локальных участках, или разделены местными слабопроницаемыми слоями.

Четвертичный водоносный комплекс объединяет отложения разного возраста, генезиса и литологического состава, внутри комплекса можно выделить несколько водоносных горизонтов, характеризующихся разными фильтрационными свойствами и разнообразным химическим составом. Наибольшее практическое значение имеет четвертичный водоносный горизонт в аллювиальных отложениях, приуроченный к современным и погребенным долинам рек.

Неогеновый, палеогеновый и меловой водоносные комплексы распространены в Альминском АБ. Межпластовые воды залегают в моноклиальной структуре, плавно погружающейся на север, основная разгрузка потока подземных вод происходит в Черное море. Локальная разгрузка осуществляется в смежные водоносные горизонты, зоны разрывных нарушений, речную сеть и родниками. Питание происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков в области выхода комплексов на поверхность, а также за счет перетока из вышележащих горизонтов в зонах нарушенного режима.

Неогеновый водоносный комплекс, широко распространенный на территории юго-западного Крыма, – основной продуктивный комплекс централизованного и децентрализованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Водовмещающие отложения терригенно-карбонатного состава приурочены преимущественно к миоценовому отделу. Химический состав и минерализация подземных вод характеризуются большой пестротой, увеличиваются от предгорной части в сторону моря, а также от верхних слоев к нижним.

Неогеновый и палеогеновый водоносные комплексы разделены региональным водоупором равнинного Крыма, сложенным майкопскими глинами, слабопроницаемыми глинами и мергелями с прослоями и линзами песка, алевролитов верхнего и среднего эоцена. Палеогеновый водоносный комплекс сложен терригенно-карбонатными отложениями. Палеогеновые отложения выходят на поверхность в центральной части изучаемого региона, где эксплуатируются отдельными скважинами. При отсутствии выдержанного разделяющего слоя между палеогеновым и верхнемеловым водоносными горизонтами они объединяются в единый водоносный комплекс.

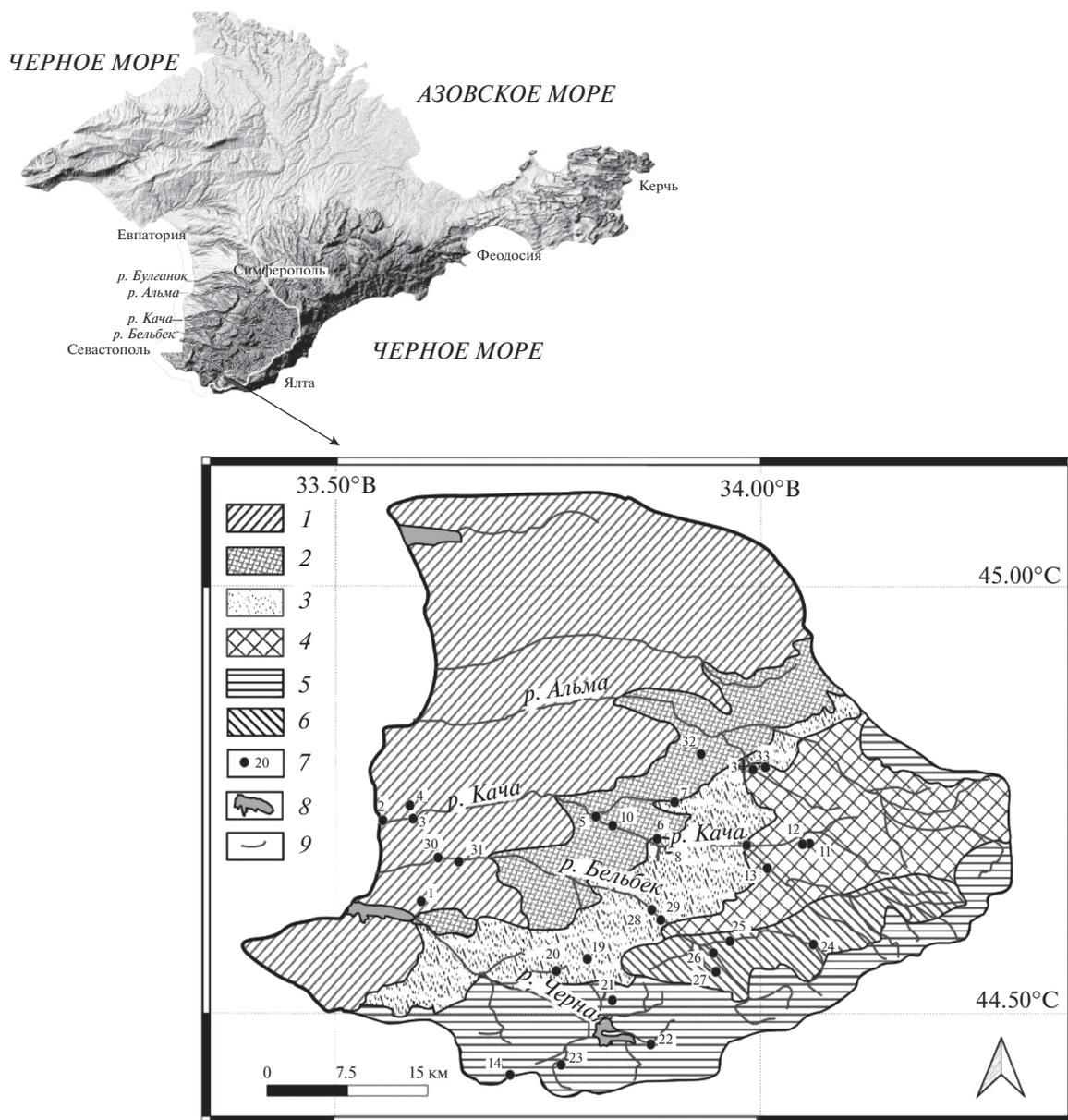


Рис. 1. Район исследования и упрощенная геологическая карта изучаемой территории с точками опробования. 1 – водовмещающие отложения терригенно-карбонатного комплекса среднего миоцена (N_2); 2 – терригенно-карбонатные отложения совмещенного неогенового и палеогенового водоносного комплекса (P_2-N_1); 3 – терригенно-карбонатные отложения мел-палеогенового возраста (K_2-P_1); 4 – флишевые отложения верхнего триаса – нижней юры (таврическая серия, T_3-J_1); 5 – верхнеюрский водоносный комплекс (J_3); 6 – песчано-глинистые породы средней юры (J_2); 7 – номера пунктов отбора соответствуют данным таблицы 1; 8 – озера; 9 – реки.

Меловой водоносный комплекс включает в себя водоносные горизонты верхнемеловых и нижнемеловых отложений. Основное водохозяйственное значение имеют нижнемеловые водоносные горизонты из терригенно-карбонатных отложений. В пределах Альминского АБ нижнемеловой водоносной комплекс не выходит на поверхность, от предгорной части в северном направлении горизонт резко погружается. Одновременно с погружением увеличивается температура

подземных вод – изменяется от 15–28°C в области инфильтрационного питания до 67°C. В горной части массив одновозрастных пород слагает мезозойскую водоносную зону экзогенной трещиноватости, которая чаще всего гидравлически разобщена с водоносным горизонтом в процессе горообразования. Термальные воды горизонта часто содержат бальнеологические компоненты – йод, бор, бром, углекислоту, метан и другие –

и обладают определенными бальнеологическими свойствами.

Верхнеюрский водоносный комплекс развит в пределах Крымской СГСО. Водовмещающие породы представлены преимущественно карбонатными отложениями. Водоносность верхнеюрских отложений различна в связи с их весьма пестрым литологическим составом, сложными условиями залегания и различной степенью карстованности [3]. Питание подземных вод происходит за счет инфильтрации и инфлюации, частично за счет конденсации и речного стока. Разгрузка происходит в значительной степени за счет родников, частично в виде субмаринных источников, а также посредством питания трещинно-жильных вод в породах мезойского возраста [7]. Трещинно-карстовые и трещинные воды верхнеюрских отложений – основной источник водоснабжения населенных пунктов Горного Крыма. Сток мощных родников зарегулирован, поскольку их воды поступают в крупные водохранилища (Аянское, Белогорское, Чернореченское, Алуштинское и др.).

Мезозойская водоносная зона экзогенной трещиноватости широко распространена в межгрядовом понижении, занимает значительную часть изучаемого региона. Водоносная зона экзогенной трещиноватости развита в пределах распространения терригенных флишевых пород таврической серии, флишеидных пород эскиординской серии (меланжевых по В.В. Юдину), вулканогенно-осадочных пород среднеюрского возраста и терригенных пород нижнемелового возраста. Подземные воды питаются за счет атмосферных осадков и перетока из смежных горизонтов. Разгрузка подземных вод происходит в Черное море, за счет родникового стока и эрозионной сети на склонах глубоковрезанных долин рек и балок. Другая часть подземного стока транспортируется по разрывным нарушениям за пределы Крымской СГСО, питая различные горизонты Альминского АБ, формирует гидрогеохимические аномалии. Химический состав подземных вод достаточно пестрый; на отдельных участках обнаружены минеральные лечебные воды, активно используемые в бальнеологии [1].

Кайнозойская и мезозойская водоносные зоны эндогенной трещиноватости (разрывные нарушения) расположены в пределах Крымской СГСО. Следует отметить, что гидрогеологическая роль разрывных нарушений не изучена. Вследствие этого можно лишь условно выделить предполагаемую кайнозойскую и мезозойскую водоносные зоны эндогенной трещиноватости по единичным или многочисленным сосредоточениям родников вдоль разрывных нарушений. Однако разрывные нарушения могут формировать специфический химический состав подземных вод.

ПОЛЕВЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ

В межлетний сезон 2021 г. (май) на территории юго-западной части силами полевого отряда из сотрудников кафедры гидрогеологии геологического факультета и кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова были проведены полевые работы. Во время выезда проводилось рекогносцировочное обследование рек и водопунктов в долинах рек Черной, Бельбек, Качи, Альмы и Западный Булганак в пределах репрезентативного бассейна. Проведен отбор проб природных вод для химических и изотопных исследований. Отобрано 38 проб воды, из них 1 проба из моря, 14 проб из родников, 2 пробы из скважин и 21 проба из рек (рис. 1, табл. 1).

Нестабильные параметры (рН, температура, жесткость, электропроводность) измерены непосредственно на месте отбора проб. Концентрация гидрокарбонат-иона была определена чуть позже (в пределах 6 ч) в лабораторных условиях методом прямого титрования кислотой с продувкой для удаления углекислоты.

Пробы для анализа катионов были отфильтрованы через целлюлозный фильтр (0.45 мкм) на месте отбора для удаления взвеси и были подкислены азотной кислотой до рН 2–3. Пробы для анализа анионов также фильтровались и собирались в полиэтиленовые пузырьки (без подкисления). Для определения химических элементов и компонентов в водах использовались различные аналитические методы. Основные катионы и анионы определялись методом жидкостной ионной хроматографии (“HPLC-10AVp”, “SHIMADZU”), а микроэлементы и рассеянные элементы анализировались с использованием плазменно-оптической эмиссионной спектрометрии (“Plasmaquant-110”) и индуктивной плазменной масс-спектрометрии (“Agilent 7700c”) в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН. Точность определения микроэлементов, включая редкоземельные элементы (РЗЭ), составляла $\geq 5\%$ RSD.

Для дальнейших исследований результаты анализов были приведены к электронейтральности путем корректировки содержания HCO_3^- (табл. 1) с использованием программного комплекса PHREEQC [21], т. е. была определена концентрация углекислоты, соответствующая измененному в полевых условиях рН.

Для количественной оценки интенсивности водной миграции химических элементов использован коэффициент водной миграции ($K_{\text{вм}}$), который определялся по формуле [9]:

$$K_{\text{вм}} = \frac{m_x \times 100}{Mn_x},$$

Таблица 1. Основные физико-химические параметры и химический состав юго-западной части Крымского п-ова

Номер пробы	Долгота (φ_{84}), град.	Широта (λ_{84}), град.	Тип водопункта	Водоносный комплекс	pH	T, °C	Электропро- водность, мСм/см ²	ОВП, мВ	мг-экв/л						мг/л					
									Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	C _{общ}	C _{неорг}	C _{орг}
1	33.601	44.633	Родник		7.04	15.1	1070	330	2.73	0.26	1.46	0.01	3.99	2.85	0.17	8.76	59.9	55.6	4.3	
2	33.549	44.7273	Скважина		7.44	18.7	360	-40	0.72	1.38	3.94	0.11	3.59	4.4	0.13	<0.1	39.2	31.7	7.5	
3	33.591	44.7271	Река	N ₂	7.43	17.2	1087	270	3.61	1.41	3.61	0.22	5	4.61	2.04	<0.1	35.9	29.3	6.6	
4	33.589	44.742	Родник		7.02	15.3	990	243	3.28	0.59	3.08	0.03	2.86	4.4	0.76	<0.1	40.1	34.7	5.4	
5	33.806	44.733	Река	P ₂ -N ₁	7.28	17.4	1071	228	3.34	1.11	3.87	0.49	6.15	3.2	1.46	<0.1	49.8	44.5	5.5	
6	33.877	44.7011	Родник		7.46	13	467	247	2.14	0.25	0.48	0.06	4.45	0.61	0.11	<0.1	67.7	58.5	9.2	
7	33.901	44.7473	»	K ₂ -P ₁	6.92	-	-	-	3.08	0.35	0.78	0.19	5.42	0.88	0.34	0.07	3.93	50.2	46.8	3.4
8	33.889	44.692	Река		7.9	18.5	584	-	1.86	0.78	1.12	0.13	3.92	0.6	0.98	<0.1	62.1	57.6	4.5	
9	33.989	44.696	»	T ₃ -J ₁	8.21	21.7	620	165	1.43	1.22	1.13	0.06	1.8	0.82	1.66	0.68	87.2	47.9	5.7	
10	33.825	44.7206	»	P ₂ -N ₁	7.65	23.7	707	123	2.29	0.93	1.27	0.13	4.81	0.88	0.97	<0.1	69.0	61.3	7.7	
11	34.056	44.6966	»		7.58	17	415	153	0.88	0.99	1.18	0.05	2.27	0.41	1.14	0.16	73.7	81.8	76.3	5.5
12	34.05	44.7043	»	T ₃ -J ₁	7.08	15.8	484	165	1.16	1.93	0.05	0.02	2.36	0.59	1.64	<0.1	59.4	51.9	7.5	
13	34.007	44.67	»		7.75	18.5	427	152	2.55	0.65	0.51	0.05	5.32	0.17	0.71	<0.1	48.6	48.7	3.5	
14	33.706	44.4292	Родник	J ₃	7.53	11.1	1098	-	4.35	0.78	2.7	0.06	5.24	2.91	2.14	<0.1	60.6	50.3	10	
19	33.796	44.5648	»	K ₂ -P ₁	7.05	10.8	168	127	1.9	0.12	0.39	0.03	3.74	0.32	0.2	<0.1	46.6	42.1	4.5	
20	33.757	44.5528	Река		7.5	11.9	511	131	2.06	0.32	0.67	0.1	5.47	0.03	0.01	<0.1	50.8	45.8	5.0	
21	33.826	44.5161	»		7.8	13.5	363	169	1.57	0.13	0.99	0.03	3.2	0.98	0.12	<0.1	53.3	48.3	5.0	
22	33.871	44.4642	»	J ₃	8.23	15.2	315	147	1.57	0.16	0.3	0.04	3.29	0.28	0.11	<0.1	40.2	45.7	5.6	
23	33.766	44.4404	Родник		7.1	12.3	501	152	2.25	0.42	0.52	0.02	4.51	0.57	0.34	<0.1	40.0	29.6	10	
24	34.058	44.5822	Река	J ₂	8	13.7	357	173	1.67	0.51	0.48	0.09	3.85	0.39	0.32	<0.1	54.8	45.4	9.4	
25	33.961	44.5844	»	T ₃ -J ₁	7.93	14.7	539	154	1.96	0.8	0.73	0.09	4.4	0.34	0.79	<0.1	50.6	41.9	8.7	
26	33.944	44.5719	»	J ₂	7.79	16.9	295	148	1.37	0.35	0.2	0.04	3.14	0.18	0.17	<0.1	51.7	46.8	4.9	
27	33.947	44.5498	Родник		7	11	391	177	2.43	0.21	0.28	0.01	4.86	0.27	0.22	<0.1	36.8	31.9	4.9	
28	33.873	44.6209	»	K ₂ -P ₁	7.18	12.2	491	144	2	0.14	0.55	0.03	3.99	0.48	0.17	1.13	37.2	39.0	2.5	
29	33.874	44.6211	Река		8.2	16	384	148	1.66	0.48	0.48	0.06	3.63	0.38	0.37	0.97	53.2	55.4	3.1	
30	33.633	44.681	»	N ₂	7.91	16.5	428	153	1.77	0.3	0.8	0.09	3.37	0.56	0.46	0.75	45.4	27.2	2.1	
31	33.645	44.6781	Родник		7.38	12	453	169	1.76	0.23	0.82	0.01	3.63	0.85	0.09	0.62	61.7	34.2	2.1	
32	33.929	44.8024	Скважина	P ₂ -N ₁	7.63	16.3	740	-130	0.62	0.48	6.04	0.2	5.2	1.06	1.09	<0.1	56.8	50.1	6.7	
33	33.993	44.7836	Родник		6.7	10.7	547	150	2.73	0.55	0.81	0.03	5.43	0.73	0.61	<0.1	42.7	36.3	6.4	
34	33.992	44.7844	Река	K ₂ -P ₁	7.45	17.9	670	155	2.26	1.18	1.64	0.1	4.9	0.9	1.41	<0.1	34.5	28.9	5.6	

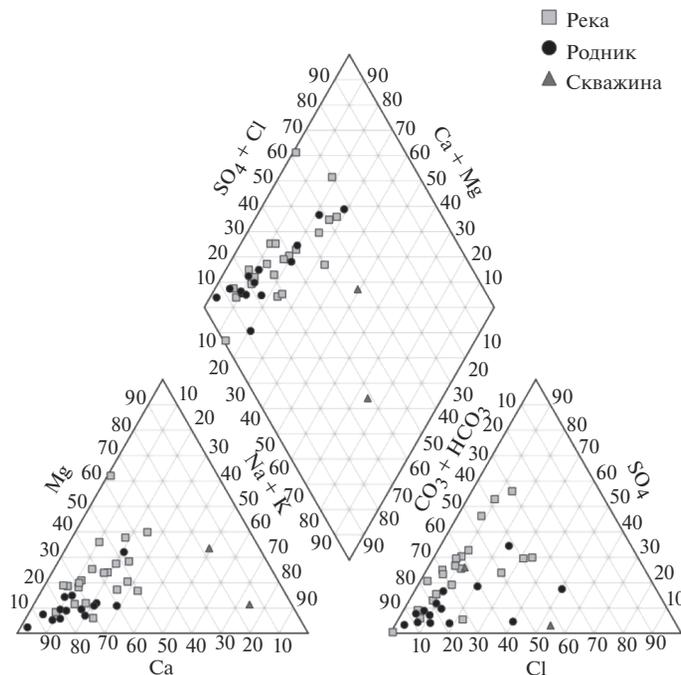


Рис. 2. Диаграмма Пайпера для изучаемых природных вод юго-западной части Крымского п-ова.

где m_x – содержание элемента в воде, M – минерализация воды, n_x – кларк элемента в земной коре [13].

Для расчета неорганических форм водной миграции микрокомпонентов, включая и группу РЗЭ, использованы программные комплексы PHREEQC [21] и Visual Minteq [20].

Изотопный анализ кислорода и водорода воды ($\delta^{18}O$ и δD) выполнен в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН в лаборатории стабильных изотопов. Пробы воды для изотопного анализа подготовлены по стандартной методике высокотемпературного пиролиза воды на углероде. Для выполнения анализов был использован высокотемпературный пиролизатор ТС/ЕА (“ThermoQuest”), соединенный с изотопным масс-спектрометром модели MAT 253 (“ThermoQuest”) через интерфейс ConFlo-IV (“ThermoQuest”). Пиролизатор ТС/ЕА использован для получения CO и H_2 в результате реакции воды с углеродом при температуре $1450^\circ C$ в восстановительных условиях и последующего хроматографического разделения продуктов пиролиза.

Для калибровки аналитической системы в ходе выполнения анализов использовали изотопные стандарты, распространяемые Международным агентством по атомной энергии (Вена): VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) и SLAP (Standard Light Antarctic Precipitation). Результаты анализов δD и $\delta^{18}O$ приведены относительно международного стандарта VSMOW. Вос-

производительность результатов при анализе данной серии образцов контролировали повторными измерениями лабораторного стандарта. Воспроизводительность результатов составила в среднем ± 0.1 и $\pm 0.8\text{‰}$ для $\delta^{18}O$ и δD соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав

Основные физико-химические параметры и макрокомпонентный состав исследуемых вод приведен в табл. 1, а графическое выражение химического состава в виде диаграммы Пайпера – на рис. 2. Изученные воды – преимущественно слабощелочные, рН вод варьирует от 6.70 до 8.23, при этом рН речных вод выше, чем рН родниковой. Электропроводность меняется в достаточно широком диапазоне – от 315 до 1098 мСм/см². Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) весьма сильно варьирует в зависимости от точки опробования: резко отрицательные значения ОВП (–130 мВ) зафиксированы в сероводородной скважине (точка опробования 32), а максимальные положительные значения (330 мВ) – в роднике у г. Инкерман (точка опробования 1).

В анионном составе исследованных подземных вод доминирует преимущественно гидрокарбонат-ион (рис. 2), однако некоторые пробы характеризуются высокими содержаниями сульф-

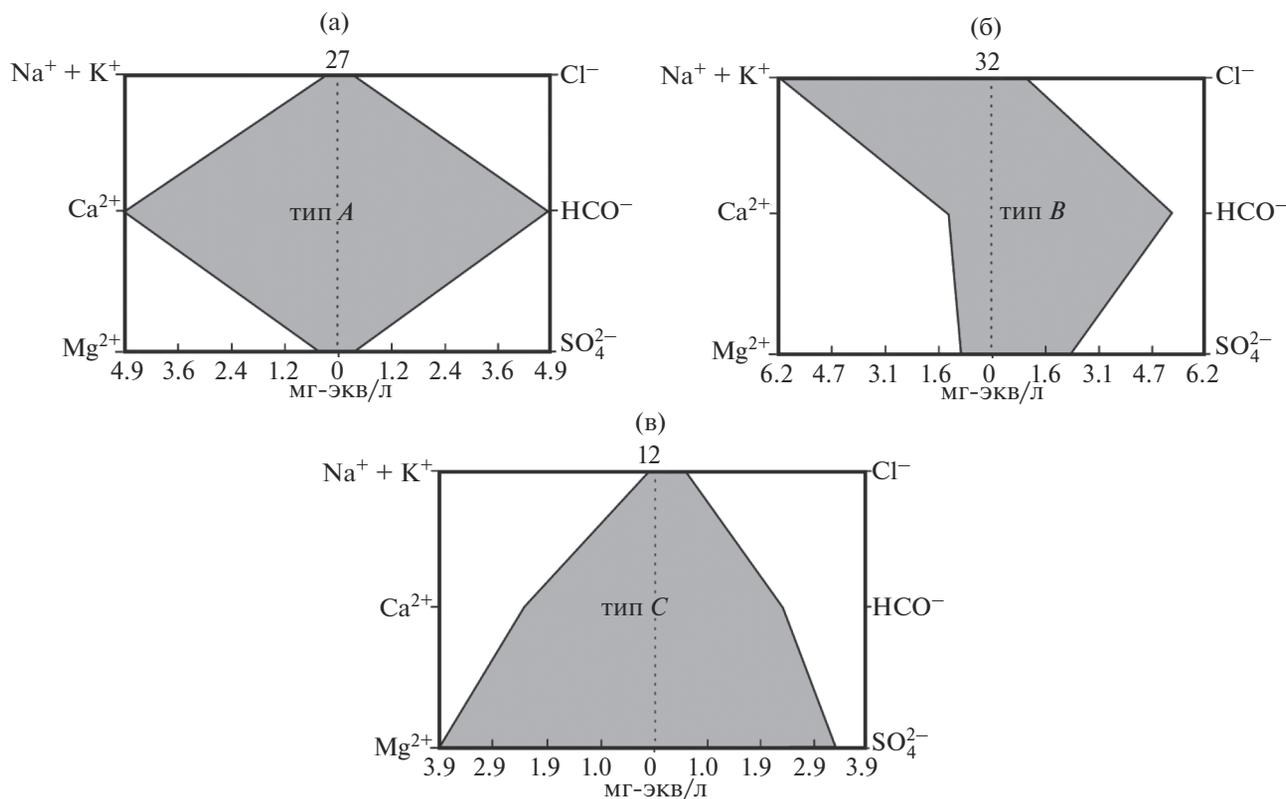


Рис. 3. Диаграммы Стиффа для основных типов подземных вод, выделяемых в юго-западной части Крымского п-ова: а – гидрокарбонатные кальциевые; б – гидрокарбонатные натриевые; в – сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые. Цифра над диаграммой – номер пробы, для которой построен паттерн.

фата и хлорида: до 37 и 55% суммы анионов соответственно.

Содержание NO_3^- весьма неоднородно и сильно варьирует от пробы к пробе: максимальные значения (87.2 и 73.7 мг/л – точки 9 и 11) фиксируются в реках, дренирующих породы таврической серии. Высокие концентрации компонента характерны для вод р. Бельбек в точках опробования 29, 30, а также в родниках 29 и 31. Возможно, повышенная концентрация NO_3^- обусловлена антропогенным фактором и связана с хозяйственной деятельностью человека на изучаемой территории, а возможно, обусловлена повышенным содержанием азота в минеральных фракциях пород таврической серии.

В остальных пробах содержание $\text{NO}_3^- \leq 10$ мг/л, что свидетельствует о низкой загрязненности природных вод по данному показателю.

В целом, содержание иона брома в исследованных водах низкое, ≥ 0.05 мг/л. Исключение составляют воды из проб 9, 11, 28–31 (табл. 1).

В катионном составе вод превалирует кальций, содержание натрия невелико (до 20%-экв), а содержание магния колеблется от 1 до 15%-экв.

Только в одной пробе, отобранной из скважины на Орловском пляже (точка опробования 2), натрий – доминирующий катион (75%-экв). В этой же точке процентное содержание магния превышает содержание кальция, что говорит о возможной интрузии морских вод.

Сравнение макрокомпонентного состава исследованных проб на основе Стифф-диаграмм позволило выделить три характерных типа природных вод на изучаемой территории (рис. 3). Тип А представляет собой гидрокарбонатные кальциевые воды с почти полным отсутствием других макрокомпонентов (рис. 3а). Воды типа А широко представлены в юго-западной части Крымского п-ова (рис. 4) и формируются, наиболее вероятно, при растворении карбонатных минералов известняков, широко представленных в водоносных горизонтах верхнеюрского и мелового, палеогенового и неогенового возрастов.

Для типа В характерно преобладание ионов натрия и гидрокарбоната, т. е. это типичные содовые воды (рис. 3б). Процессы их формирования могут быть достаточно разнообразными и дискуссионными [10, 17]: подобные воды могут формироваться как в результате обменных реакций с глинистыми фракциями, так и при растворении

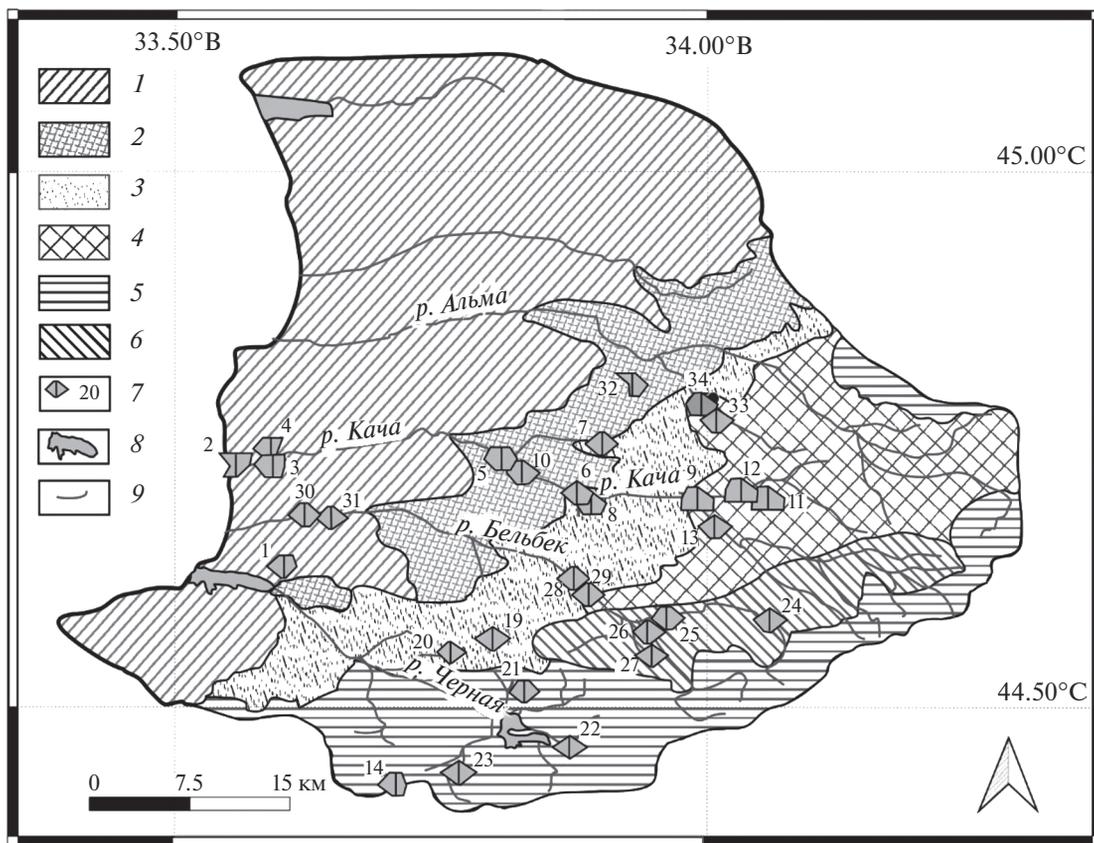


Рис. 4. Макрокомпонентный состав исследуемых вод и его связь с водовмещающим комплексом пород. 1 – водовмещающие отложения терригенно-карбонатного комплекса среднего миоцена (N_2); 2 – терригенно-карбонатные отложения совмещенного неогенового и палеогенового водоносного комплекса (P_2-N_1); 3 – терригенно-карбонатные отложения мел-палеогенового возраста (K_2-P_1); 4 – флишевые отложения верхнего триаса – нижней юры (таврическая серия, T_3-J_1); 5 – верхнеюрский водоносный комплекс (J_3); 6 – песчано-глинистые породы средней юры (J_2); 7 – Стифф-диаграммы для водных фаз соответствующих водопунктов; 8 – озера; 9 – реки. Номера проб соответствуют номерам проб в табл. 2.

натрийсодержащих алюмосиликатов. Воды типа *B* выявлены в подземных водах мелового водоносного комплекса, отобранных из скважин (пробы 2 и 32; табл. 1).

К водам типа *C* отнесены сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые воды (рис. 3с), характерные преимущественно для поверхностных водотоков, формирующихся на территории выхода на поверхность флишевых отложений таврической серии. Химический состав этих вод, по-видимому, формируется в результате взаимодействия подземных вод с минералами, слагающими породу таврической серии, и последующей их разгрузки в поверхностные водотоки (рис. 4).

Большинство исследованных проб представляет собой промежуточные варианты между основными типами (рис. 3, 4). Состав поверхностных вод изучаемой области закономерно изменяется при движении потока от истока к устью по породам таврической серии – в водах увеличивается содержания ионов сульфата и магния. Это

обусловлено, вероятно, более интенсивным растворением пород таврической серии при увеличении времени взаимодействия в системе вода–порода.

В целом, во всех пробах зафиксировано достаточно высокое содержание общего углерода $C_{общ}$, абсолютные значения концентраций которого варьируют от 27.2 до 81.8 мг/л в зависимости от точки опробования. Максимальное значение $C_{общ}$ выявлено в пробе 11, отобранной из р. Финарос, дренирующей породы таврической серии (рис. 5). Минимальное значение параметра фиксируется в пробе 30, отобранной в среднем течении р. Бельбек. Не выявлено корреляции между содержанием $C_{общ}$ и типом природных вод, т. е. поверхностные и подземные воды могут содержать компонент в широком диапазоне абсолютных значений. Концентрации $C_{общ}$ также варьируют вдоль течения поверхностных водотоков, однако закономерность в изменении параметра не выявлена. Вероятнее всего, природный есте-

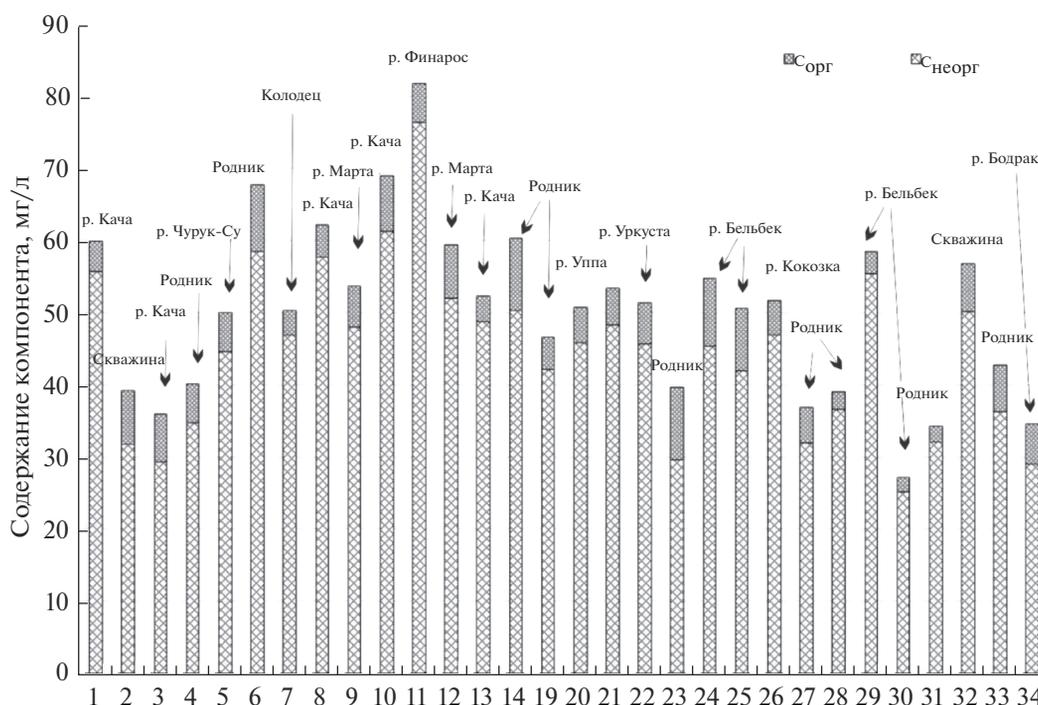


Рис. 5. Распределение содержания неорганической $C_{\text{неорг}}$ и органической $C_{\text{орг}}$ форм углерода в пробах природных вод юго-западной части Крымского п-ова. Номера проб соответствуют номерам проб в табл. 1.

ственный источник неорганического углерода на изучаемой территории – карбонатные минеральные фазы, слагающие водовмещающие толщи, широко распространенные в этом регионе.

Большая часть углеродной составляющей во всех пробах представлена неорганическим углеродом, его содержание $>80\% C_{\text{общ}}$.

Как известно, значительное влияние на содержание органических веществ оказывает антропогенная деятельность человека, и наиболее высокие концентрации $C_{\text{орг}}$ обычно фиксируются в районе развитого сельского хозяйства. Почвенный покров территории – один из важнейших факторов поставки $C_{\text{орг}}$ в природные воды. Однако абсолютные значения $C_{\text{орг}}$ в изученных водах невелики – 2.1–10 мг/л. Полученные авторами статьи данные показывают, что наибольшее количество $C_{\text{орг}}$ в воде действительно обнаружено в местах с наивысшей антропогенной нагрузкой.

В результате проведенных исследований получены новые данные по микрокомпонентному составу природных вод юго-западной части Крымского п-ова, приведенные в табл. 2.

Среди сидерофильных элементов значительные концентрации в изучаемых водах имеют только железо, кобальт, никель. Содержания железа в целом невелико, варьирует достаточно сильно по водопунктам – 0.005–0.386 мг/л. Наибольшая концентрация элемента отмечена в под-

земных водах, выводимых скважиной 2. Чем обусловлена повышенная концентрация общего железа $Fe_{\text{общ}}$ в воде данного водопункта, пока непонятно, так как в водах родников, циркулирующих в данном водоносном горизонте, концентрации на порядок ниже. Возможно, восстановительные условия в данной системе (ОВП –40 мВ) позволяют накапливаться Fe^{2+} , в то время как при выходе вод родников на поверхность земли происходит изменение ОВП на окислительный, что вызывает окисление железа, и оно удаляется из раствора в виде гидроокислов. Расчет форм миграции железа показал, что в скважине (проба 2) основная форма миграции железа – Fe^{2+} ($>94\%$).

Содержание кобальта невысокое и практически одинаковое во всех пробах, за исключением вод из скважин (пробы 2 и 32), в которых концентрация элемента почти на порядок меньше, чем в остальных пробах – 0.163 и 0.557 мкг/л соответственно. Основная форма водной миграции элемента – Co^{2+} , и ее содержание составляет 94–98%. Далее следуют $CoHCO_3^+$ и $CoSO_{4(aq)}$.

Концентрации никеля варьируют от источника к источнику и могут различаться в разных скважинах практически на порядок (табл. 2). Наибольшие содержания элемента (7.261 мкг/л) зафиксированы в колодце (точка 7), в то время как минимальные концентрации никеля выявлены в подземных водах, опробованных из скважин

Таблица 2. Микрокомпонентный состав природных вод юго-западной части Крымского п-ова

Номер пробы	Тип водо-пункта	Водный комплекс	мг/л														мкг/л													
			Si	B	Fe	Sr	Ba	Li	P	Zn	Al	As	Mn	Ti	V	Cr	Rb	Cs	Co	Ni	Cu	Be								
1	Родник		5.79	0.030	0.005	0.393	0.095	6.31	45.37	11.03	38.25	0.270	0.49	0.175	0.740	0.925	1.913	0.053	0.351	1.349	5.07	0.005								
2	Сква-жина	N ₂	6.94	0.108	0.386	1.250	0.056	13.18	11.56	18.07	12.70	0.700	12.29	0.205	0.212	1.142	1.949	0.011	0.068	0.454	2.53	0.001								
3	Река		2.99	0.206	0.028	1.887	0.065	15.25	30.83	31.64	40.85	1.110	13.55	0.588	0.401	1.028	1.958	0.009	0.398	4.811	19.24	0.003								
4	Родник		4.72	0.083	0.025	0.702	0.060	7.42	16.64	23.78	47.63	0.192	1.41	0.574	0.472	2.165	0.383	0.004	0.278	1.393	1.90	0.004								
6	»	K ₂ -P ₁	5.13	0.020	0.019	0.581	0.021	3.27	17.12	12.92	19.29	0.316	1.02	0.191	1.856	1.469	0.860	0.003	0.198	1.503	1.77	≤0.001								
7	»		11.98	0.044	0.050	1.400	0.061	9.13	396.93	52.84	45.49	2.344	11.93	0.707	4.254	1.138	2.192	0.005	0.494	7.261	11.92	0.003								
14	»	J ₃	3.82	0.090	0.036	0.724	0.057	7.82	62.19	21.46	22.38	0.822	1.16	0.320	0.369	0.836	0.586	0.004	0.557	3.193	3.88	0.002								
19	»	K ₂ -P ₁	4.07	0.027	0.032	0.593	0.211	4.37	8.64	21.95	32.95	0.119	2.55	0.495	0.246	0.247	0.995	0.006	0.155	0.844	1.02	≤0.001								
23	»	J ₃	2.90	0.070	0.030	0.516	0.021	3.39	7.66	17.93	30.53	0.102	1.84	0.329	0.178	0.187	0.236	0.005	0.208	1.245	1.43	0.001								
27	»	J ₃	2.51	0.024	0.034	0.141	0.016	1.87	11.30	37.19	23.39	0.140	2.25	0.314	0.139	0.226	0.194	0.003	0.237	1.346	2.15	0.001								
28	»	K ₂ -P ₁	3.71	0.041	0.046	0.807	0.120	5.08	6.15	37.05	26.96	0.117	4.01	0.297	0.193	0.697	0.554	0.004	0.208	1.180	1.41	0.001								
31	»	N ₂	4.91	0.027	0.018	0.323	0.046	2.85	13.29	16.44	10.17	0.348	1.55	0.148	1.238	0.742	0.319	0.002	0.163	0.687	0.80	≤0.001								
32	Сква-жина	P ₂ -N ₁	11.23	0.327	0.018	3.381	0.010	13.97	8.02	11.89	7.92	0.083	5.82	0.170	0.039	0.547	3.143	0.008	0.054	0.451	1.36	≤0.001								
33	Родник	K ₂ -P ₁	4.42	0.079	0.022	0.999	0.177	5.74	7.63	17.11	12.04	0.110	1.09	0.227	0.079	0.448	0.372	0.003	0.197	1.056	0.76	≤0.001								
Номер пробы	Тип водо-пункта	Водный комплекс	мг/л														мкг/л													
			Ga	Ge	Mo	Se	Nb	Zr	Ag	Cd	Sn	Sb	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U											
1	Родник	N ₂	0.024	0.014	0.227	0.565	0.0045	0.078	14.733	0.023	0.086	0.221	0.0004	0.0043	0.006	1.989	0.0014	1.197												
2	Сква-жина		0.014	0.051	0.418	0.271	0.0084	0.046	0.234	0.022	0.018	0.253	0.0004	0.0106	0.0061	4.378	0.0022	1.334												
3	Река		0.017	0.020	1.651	0.993	0.0017	0.154	0.138	0.050	0.755	0.349	0.0004	0.0073	0.0092	3.545	0.0045	3.088												
4	Родник		0.014	0.029	0.536	1.032	0.007	0.126	0.026	0.029	0.041	0.492	0.0004	0.0032	0.0024	6.564	0.0045	0.828												
6	»	K ₂ -P ₁	0.014	0.009	0.799	2.238	0.0058	0.086	0.027	0.025	0.029	1.121	0.0003	0.0028	0.0122	7.577	0.042	1.525												
7	»		0.015	0.019	1.947	2.252	0.0087	0.289	0.106	0.113	0.114	0.218	0.0003	0.0097	0.008	3.390	0.047	1.722												
14	»	J ₃	0.009	0.018	1.312	0.765	0.0064	0.111	0.029	0.026	0.028	0.197	0.0009	0.0189	0.0067	2.852	0.017	0.696												

Таблица 2. Окончание

Номер пробы	Тип водо-пункта	Водо-ный комплекс	мкг/л														Lu	Hf	
			Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm			Yb
19	»	K ₂ -P ₁	0.011	0.022	0.126	0.312	0.001	0.043	0.011	0.016	0.027	0.050	0.0002	0.0044	0.0044	1.267	0.015	0.0042	0.343
23	»	J ₃	0.010	0.007	0.086	0.825	0.0008	0.090	0.009	0.030	0.016	0.049	0.0002	0.0145	0.0014	1.579	0.013	0.0043	0.333
27	»	J ₂	0.008	0.004	0.072	0.09	0.015	0.092	0.008	0.034	0.026	0.071	0.0003	0.0058	0.0019	2.841	0.031	0.0035	0.268
28	»	K ₂ -P ₁	0.008	0.006	0.222	0.189	0.0139	0.097	0.013	0.038	0.035	0.176	0.0004	0.0058	0.0011	6.166	0.042	0.007	0.371
31	Родник	N ₂	≤0.0064	0.014	0.192	0.463	0.019	0.043	0.007	0.017	0.016	0.153	0.0002	0.0012	0.0009	3.203	0.011	0.0023	0.857
32	Сква-жина	P ₂ -N ₁	≤0.0064	0.319	1.512	≤0.065	0.0093	0.142	0.007	0.026	0.009	0.142	0.0005	0.0282	0.0013	3.254	0.010	0.0019	0.007
33	Родник	K ₂ -P ₁	≤0.0064	0.020	0.290	0.186	0.0109	0.222	0.008	0.018	0.017	0.033	0.0003	0.0018	0.0008	3.407	0.013	0.0025	0.967
1	Родник		0.082	0.0433	0.00619	0.011	0.005	0.0037	0.00222	0.011	0.0031	0.00024	0.0014	0.0002	0.0009	0.0001	0.001	0.0002	0.0022
2	Сква-жина	N ₂	0.066	0.0163	0.00808	0.014	0.0014	0.0056	0.00222	0.007	0.0026	0.00028	0.0011	0.0002	0.0006	0.0002	0.0005	0.0002	0.001
3	Река		0.0787	0.0351	0.01633	0.028	0.0029	0.0121	0.00368	0.0088	0.0062	0.0006	0.0036	0.0007	0.0028	0.0005	0.0033	0.0006	0.003
4	Родник		0.0893	0.0222	0.01544	0.029	0.0034	0.0113	0.00403	0.0082	0.0042	0.00044	0.0031	0.0004	0.0014	0.0003	0.0016	0.0003	0.0022
6	»		0.0611	0.0212	0.01698	0.027	0.0035	0.0156	0.00326	0.003	0.0037	0.00059	0.0027	0.0006	0.0015	0.0003	0.001	0.0002	0.0016
7	»	K ₂ -P ₁	0.1299	0.0364	0.04361	0.072	0.0097	0.0357	0.0079	0.0087	0.0089	0.00101	0.005	0.0011	0.0028	0.0005	0.0026	0.0005	0.0059
14	»	J ₃	0.0852	0.0236	0.01067	0.015	0.002	0.0084	0.00335	0.0075	0.0037	0.00039	0.0023	0.0007	0.0018	0.0003	0.0021	0.0003	0.0029
19	»	K ₂ -P ₁	0.0671	0.0352	0.01932	0.022	0.0034	0.0149	0.00585	0.0257	0.0076	0.00062	0.0032	0.0007	0.0024	0.0004	0.0026	0.0004	0.0015
23	»	J ₃	0.052	0.0233	0.01269	0.028	0.0035	0.0138	0.00323	0.0031	0.0037	0.00063	0.0029	0.0005	0.0203	0.0003	0.0015	0.0002	0.0031
27	»	J ₂	0.0456	0.035	0.0127	0.023	0.0032	0.0125	0.00374	0.003	0.0038	0.00075	0.004	0.001	0.0074	0.0005	0.003	0.0005	0.0014
28	»	K ₂ -P ₁	0.0532	0.0296	0.01721	0.027	0.0032	0.0139	0.00549	0.0154	0.0059	0.00058	0.0028	0.0007	0.004	0.0003	0.0017	0.0003	0.0016
31	»	N ₂	0.0592	0.0124	0.00703	0.012	0.0015	0.0061	0.00218	0.0062	0.0024	0.00031	0.0014	0.0003	0.0047	≤0.0001	0.0008	0.0002	0.001
32	Сква-жина	P ₂ -N ₁	0.1058	0.0314	0.00494	0.009	0.0011	0.0051	0.00144	0.0014	0.0013	0.00018	0.0011	0.0002	0.0055	0.0001	0.0007	0.0002	0.0033
33	Родник	K ₂ -P ₁	0.063	0.0292	0.01232	0.013	0.002	0.0094	0.00441	0.0212	0.0056	0.00036	0.0022	0.0005	0.0046	0.0002	0.0012	0.0002	0.0051

(0.454 и 0.451 мгк/л для точек опробования 2 и 32 соответственно). Столь значительная дисперсия обусловлена, вероятно, неравномерным распределением концентрации элемента в водовмещающих толщах в регионе исследования. Основная форма водной миграции элемента – Ni^{2+} , далее следуют $\text{NiHCO}_3^+ > \text{NiCO}_3(\text{aq}) > \text{NiSO}_4(\text{aq})$.

Сравнение подвижности элементов этой группы на основе коэффициента водной миграции показывает, что наиболее интенсивно в данных условиях выносятся никель, далее следует железо, а подвижность кобальта самая низкая. $K_{\text{вм}}$ для никеля – 0.011–0.184, для железа – 0.005–0.05 и для кобальта – 0.004–0.042. Наибольшая интенсивность миграции железа характерна для подземных вод с восстановительной обстановкой (водопункт 2).

Среди халькофильных микроэлементов особого внимания заслуживают такие элементы, как медь, цинк, галлий, мышьяк, селен, серебро, кадмий и свинец. Содержание меди в изученных природных водах весьма неравномерное, наибольшая концентрация элемента зафиксирована в пробах 3 и 7 (19.24 и 11.92 мгк/л соответственно; табл. 2). Во всех остальных пробах концентрации меди на порядок ниже, но примерно равные – 0.76–5.07 мгк/л. Основная форма миграции элемента в природных водах – $\text{CuCO}_3(\text{aq})$, далее следуют Cu^{2+} и CuOH^+ . Медь характеризуется незначительной интенсивностью водной миграции, $K_{\text{вм}}$ – 0.03–0.66; при этом наибольший $K_{\text{вм}}$ характерен для вод р. Кача (точка 3).

Концентрации цинка варьируют от 11.03 до 52.84 мгк/л, наибольшее содержание элемента зафиксировано в роднике (водопункт 7). Основная форма водной миграции элемента – Zn^{2+} , далее следуют карбонатная ($\text{ZnCO}_3(\text{aq})$) и гидрокарбонатная (ZnHCO_3^+) формы, а затем сульфатная ($\text{ZnSO}_4(\text{aq})$). Все остальные формы практически отсутствуют. Цинк имеет среднюю скорость выноса из водовмещающих толщ изучаемой территории, его $K_{\text{вм}}$ составляет 0.3–1.4.

Содержание мышьяка в исследованных пробах невысокое, ниже кларка элемента в водах зоны гипергенеза (1.46 мгк/л) и варьирует от 0.083 до 0.822 мгк/л. Только в двух пробах (точки 3 и 7) концентрация мышьяка повышена до 1.110 и 2.344 мгк/л соответственно. Расчеты форм миграции показали, что основная форма миграции мышьяка в данных водах – HAsO_4^{2-} (>70%), далее следует H_2AsO_4^- (~20%), все остальные формы по сумме $\leq 10\%$. Вероятный источник элемента в природных водах данной территории – сульфидные минералы, содержащие мышьяк (арсенопирит, реальгар и аурипигмент). $K_{\text{вм}}$ мышьяка силь-

но варьирует в зависимости от точки опробования – от 0.09 до 2.4, максимальные значения выявлены для точки 7, а минимальные – для сероводородных вод скважины (водопункт 32).

В подземных водах юго-западной части Крымского п-ова содержание галлия низкое, на порядок ниже, чем кларк галлия в земной коре (0.37 мгк/л), и практически равно кларку галлия в морской воде (0.02 мгк/л). Термодинамические расчеты показывают, что миграция галлия осуществляется преимущественно в виде комплекса $\text{Ga}(\text{OH})_4^-$. Галлий имеет весьма низкую интенсивность водной миграции, и его $K_{\text{вм}}$ характеризуется весьма низкими значениями – 10^{-3} – 10^{-4} .

Селен в изученных водах проявляет высокую дисперсность – максимальные содержания элемента, более чем в два раза превышающие его кларк в зоне гипергенеза, выявлены в родниках неогенового и палеогенового водоносных комплексов и составляют 1.032, 2.238 и 2.252 мгк/л (точки опробования 4, 6 и 7 соответственно), а минимальные – 0.065 мгк/л в сероводородной скважине (водопункт 32). Термодинамические расчеты показывают, что селен присутствует в подземных водах юго-западного Крыма преимущественно в виде селенита (SeO_3^{2-} до 20%) и гидроселентин-ионов ($\text{HSeO}_3^- > 80\%$). Зависимости между катионным составом воды и содержанием в ней селена не установлено. Для селена характерна весьма значительная скорость выноса из водовмещающих толщ, его $K_{\text{вм}}$ составляет 3.5–85.6.

Серебро в исследованных водах, за исключением неогенового родника (водопункт 1), содержится в весьма низких концентрациях (0.007–0.23 мгк/л), ниже кларковых концентраций элемента в зоне гипергенеза (0.26 мгк/л). Весьма высокое содержание серебра – 14.733 мгк/л – в водах родника (точка опробования 1), изливающегося в терригенно-карбонатных породах среднего возраста, пока необъяснимо – возможно, это аналитическая ошибка. Необходимо провести дополнительное опробование. $K_{\text{вм}}$ для серебра в воде родника составляет 400, что практически на два порядка выше, чем для других водопунктов (0.2–6.36).

Уровень содержания кадмия в опробованных водах весьма низкий (0.016–0.113 мгк/л) и не превышает кларк элемента в водах зоны гипергенеза. Кадмий достаточно интенсивно извлекается из водовмещающих пород, $K_{\text{вм}}$ элемента – 0.17–1.08.

Среди литофильных микроэлементов высокие концентрации диагностированы для стронция (0.323–1.887), бария (0.01–0.211) и рубидия (0.192–3.143 мгк/л). Концентрации цезия (0.002–0.053), алюминия (7.92–47.63 мгк/л) и марганца

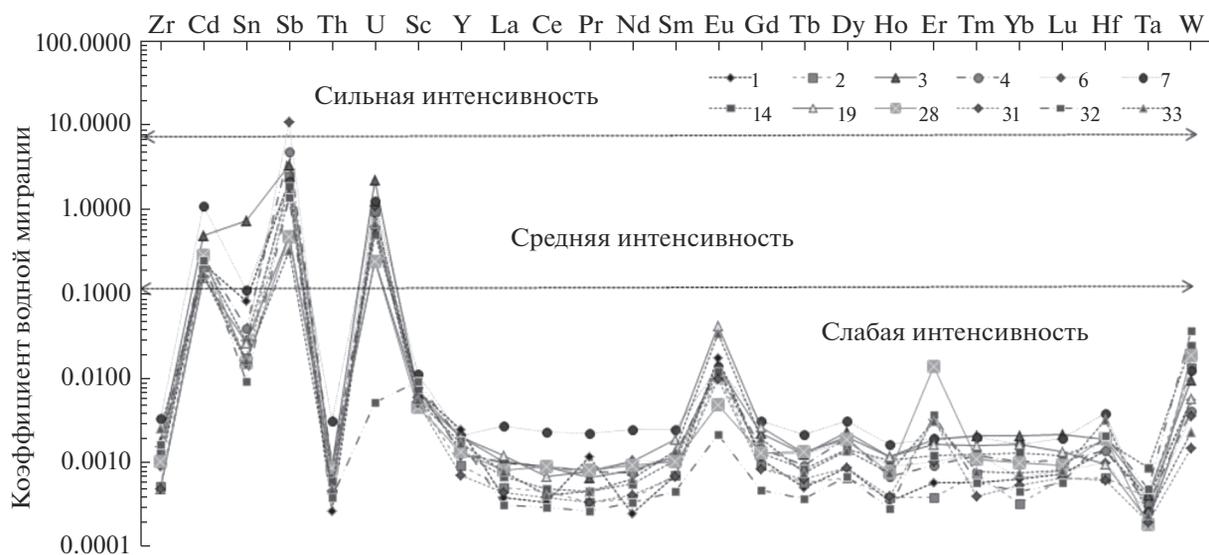


Рис. 6. Ряды миграции некоторых элементов в природных водах юго-западной части Крымского п-ова. Номера проб соответствуют номерам проб в табл. 2.

(0.49–13.55 мкг/л) невысокие — ниже их кларка в водах зоны гипергенеза. Ванадий, хром и титан имеют весьма низкие содержания (<5 мкг/л), характеризующиеся высокой дисперсностью. Максимальные концентрации ванадия и хрома выявлены в родниках неогенового и палеогенового водоносных комплексов (табл. 2). Содержание бора невелико и составляет всего 0.02–0.32 мг/л.

Уровень содержания урана в исследованных водах низкий — ниже кларка элемента для вод зон гипергенеза, за исключением пробы 3, отобранной из поверхностных вод р. Качи, а также проб 6 и 7, взятых из родников, изливающихся из терригенно-карбонатных отложений K_2-P_1 . Концентрация урана варьирует от 0.007 до 3.088 мкг/л и регулируется литологией водовмещающей толщи, а также химическим составом подземных вод. При pH раствора 6–8 в природных водах наиболее распространены карбонатные комплексы, а тип комплекса зависит от концентрации CO_3^{2-} в растворе: ($[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ преобладает в растворе с его избытком, а $[UO_2(CO_3)_2(H_2O)_2]^{2-}$ — при разбавлении [2]. Расчеты авторов статьи показывают, что в подземных водах юго-западной части Крыма преобладающая (>70%) форма водной миграции — $Ca_2UO_2(CO_3)_{3aq}$, далее следует $CaUO_2(CO_3)_3^{2-}$ (>15%), остальные комплексы (UO_2CO_{3aq} , $UO_2(CO_3)_2^{2-}$, $UO_2(CO_3)_3^{4-}$) находятся в незначительном количестве. $K_{вм}$ урана сильно варьирует в пробах — 0.005–2.17 (рис. 6). Такие абсолютные значения $K_{вм}$ свидетельствуют о том, что интенсивность миграции элемента зависит от окислительной-восстановительной обстанов-

ки внутри системы. Меньшая интенсивность характерна для восстановительной среды, как, например, в сероводородной скважине (точка опробования 32).

Концентрации тория в изученных водах почти на два порядка ниже, чем концентрации урана, и составляют 0.004–0.0158 мкг/л. Как известно, торий — один из наименее подвижных в процессе выщелачивания элемент [12], для примера — растворимость в воде U^{6+} на три порядка выше, чем Th^{4+} . Основной минерал концентратор тория — торит (до 47 мас. % Th), значительные количества элемента также диагностированы в цирконах (до 7 мас. %) и монацитах (до 1.6 мас. %). $K_{вм}$ тория очень низкий, почти на порядок (иногда на два порядка) ниже, чем $K_{вм}$ урана, — 10^{-4} – 10^{-3} .

Основная форма миграции тория — $Th(OH)_3CO_3^-$, содержание которого составляет > 50%, далее следуют $Th(CO_3)_2(OH)_2^{2-} \gg \gg ThCO_3(OH)_{2aq} > Th(OH)_{4aq} > Th(OH)_3^+$.

Общее количество растворенных РЗЭ (истинно растворенная форма и коллоидная составляющая) в изученных водах невелико — 0.033–0.199 мкг/л. Для изученных природных вод характерна сильная вариативность содержания РЗЭ: максимальная концентрация РЗЭ наблюдается в родниках, локализованных в толщах K_2-P_1 (водопункты 7 и 19), а минимальные содержания диагностируются в подземных водах, отобранных из скважин (точки 2 и 32). Во всех образцах обнаружено весьма значительное (68–84%) обогащение легкими РЗЭ, в отличие от иттрия и тяжелых РЗЭ, в целом последовательность в ряду легких (Lu–

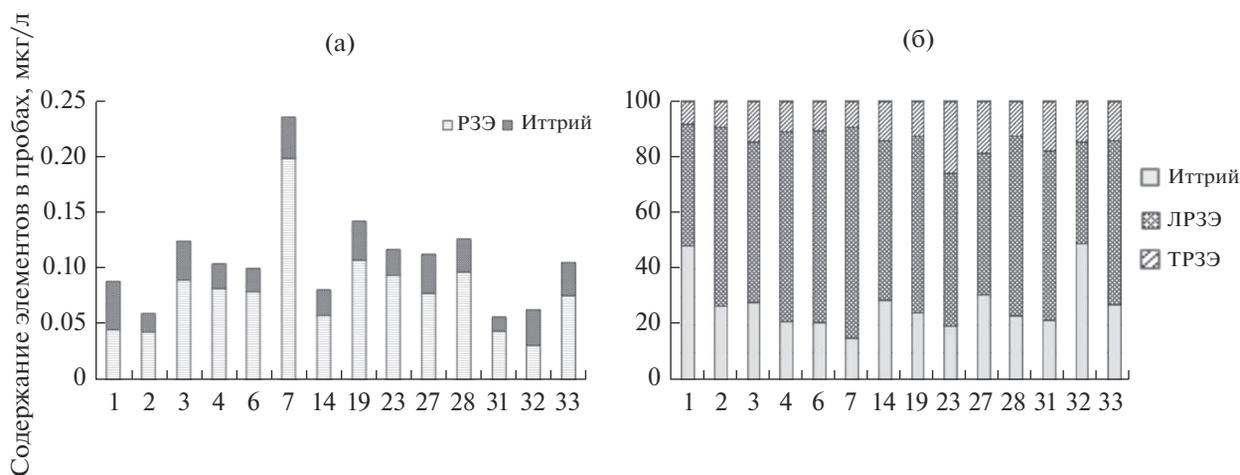


Рис. 7. Распределение РЗЭ и иттрия в исследованных водах: а – абсолютные содержания РЗЭ и иттрия; б – процентное соотношение легких (ЛРЗЭ), тяжелых редкоземельных элементов (ТРЗЭ) и иттрия. Номера проб на рисунке соответствуют номерам проб в табл. 2.

Eu), тяжелых (Ho–Lu) РЗЭ и Y выглядит так: ЛРЗЭ >>> Y > ТРЗЭ.

На диаграмме на рис. 7 видно, что нормализованные по отношению к NASC тренды распределения РЗЭ – достаточно пологие, что типично для пресных подземных вод [15]. Отчетливо проявляется положительная аномалия по европию для всех проб, по эрбию – для проб 23, 27, 28, 32 и 33 и по празеодиму – для пробы 1, а также отрицательная по церию для всех проб, за исключением проб из скважин (точки 2 и 23).

Природа европиевой аномалии не ясна. Возможно, это следствие либо растворения в водовмещающих толщах Eu-концентрирующих минералов (например, плагиоклазов), либо обеднения водных фаз соседними с Eu элементами (Sm и Gd), либо аналитической ошибки. Отрицательная аномалия церия обусловлена, наиболее вероятно, окислением церия (+3) до церия (+4) в водах, что подтверждается значениями ОВП (табл. 1). В пробах скважин, для которых характерны восстановительные условия, подобной аномалии не выявлено, так как отсутствие в водах кислорода приводит к увеличению количества растворенных форм церия и, как следствие, к отсутствию отрицательной цериевой аномалии.

В изученных природных водах содержание скандия весьма низкое, почти в два раза ниже, чем кларк элемента для вод зоны гипергенеза, и составляет 0.046–0.13 мкг/л. Минимальные значения характерны для родников верхнеюрской водоносной толщи, а максимальные – для вод из скважины (точка 32) и родника, локализованного в терригенно-карбонатных отложениях мел-палеогенового возраста (водопункт 7). Преобладающая форма водной миграции скандия – Sc(OH)₂⁺,

которая составляет >80%, далее следуют ScF₂⁺ и Sc(OH)_{3aq}. Содержание всех остальных форм по сумме <5%. Концентрации гафния в изученных водах невелики и достаточно сильно варьируют – 0.001–0.006. Основная неорганическая форма миграции элемента – Hf(OH)₅⁻.

Все элементы группы РЗЭ, включая иттрий, скандий и гафний, характеризуются низкой скоростью выноса из водовмещающих пород (рис. 8). Наибольшее значение K_{вм} для этой группы элементов характерно для двух элементов – Eu и Sc.

Изотопный состав

Опубликованные немногочисленные данные по δ¹⁸O и δ²H в подземных водах Главной гряды Крымских гор, Предгорья и Крымской равнины близки к показателям Локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) и свидетельствуют об их инфльтрационном характере [6, 14, 19, 18].

Полученные авторами статьи содержания δ¹⁸O и δ²H в природных водах юго-западной части Крымского п-ова представлены в табл. 3. Очевидно, что подземные воды родников имеют более тяжелый изотопный состав, чем воды скважин. Для вод родников характерны следующие значения: от –6.6 до –9.4 ‰ для δ¹⁸O, от –47.4 до –63.7 ‰ для дейтерия. Для вод скважин диагностированы более низкие значения: для δ¹⁸O –10.4 и –13.9 ‰, а для δ²H –69.2 и –97.2 ‰. На бинарной диаграмме в координатах δ¹⁸O и δ²H (рис. 9) большинство значений для подземных вод родников ложится очень близко к ЛЛМВ [18], подтверждая их исходно метеорный состав. Полученные данные показывают, что области питания большин-

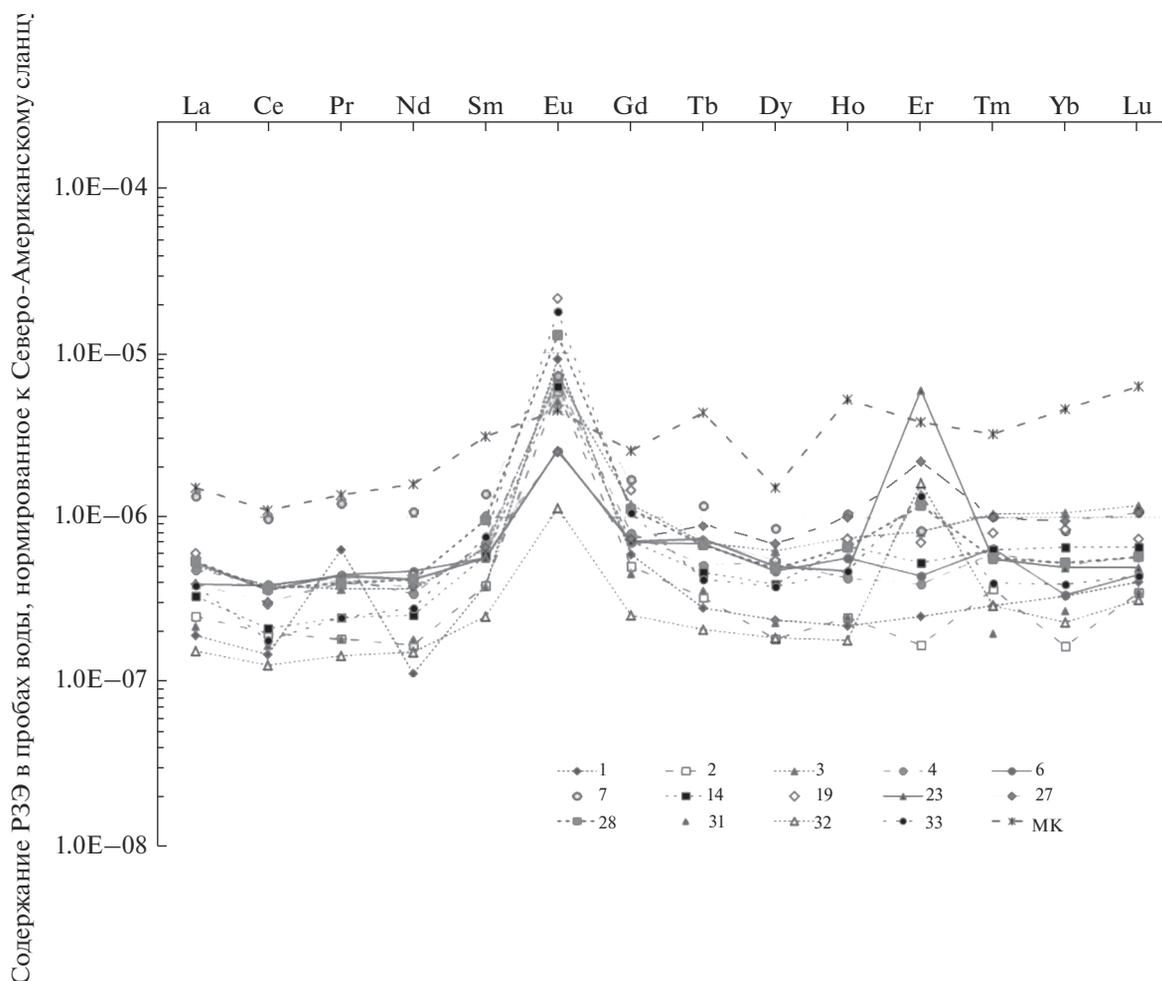


Рис. 8. Спектры распределения РЗЭ в природных водах юго-западной части Крымского п-ова. Для сравнения добавлены данные по содержанию РЗЭ в водах Черного моря (проба МК). Номера проб соответствуют номерам проб в табл. 2.

ства родников расположены на высотных отметках 800–1200 м.

Облегченный изотопный состав исследованных родников (за исключением 4, 19 и 27), в сравнении с расчетными среднегодовыми атмосферными осадками в областях их питания (рис. 9), указывает на преобладание в них зимнего питания. По данным [19], изотопный состав атмосферных осадков Крымского п-ова в течение года значительно варьирует – в области $\sim 60\%$ для δD и $\sim 7\%$ для $\delta^{18}O$.

Незначительное отклонение поверхностных вод р. Качи от ЛЛМВ обусловлено, по-видимому, эффектом испарения.

Некоторое утяжеление изотопного состава вод родников 4 и 27 обусловлено, вероятно, присутствием в них незначительного количества морской воды. Но так как данных недостаточно, то это предположение нуждается в дополнительном изучении.

Изотопный состав вод, выводимых скважиной 2, намного легче, чем изотопный состав других исследованных подземных вод, а также вод глубокого водоносного горизонта (рис. 9), отобранных из блока верхнеюрских известняков в урочище Красной пещеры, изученных в [4]. Авторы настоящей статьи согласны с предположением авторов [4], что это воды весьма “длительного” периода водообмена и они проникли в подземные горизонты в доголоценовую эпоху в период оледенения, когда осадки были более холодные, чем современные. Отклонение вод скважины 32 от ЛЛМВ, вероятно, обусловлено присутствием сероводорода в воде и обменом δ^2H между газовой фазой и водой.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показывают, что природные воды юго-западной части Крымского п-ова характеризуются широким спектром хими-

Таблица 3. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в изученных образцах, ‰

Номер пробы	Тип водопункта	Водоносный комплекс	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$
1	Родник		-8.1	-56
2	Скважина	N_2	-13.9	-97.2
3	Река Кача		-7.5	-52.1
4	Родник		-6.9	-50.5
6	»	$\text{K}_2\text{-P}_1$	-8.6	-58.5
7	»		-9.4	-63.7
13	»	$\text{T}_3\text{-J}_1$	-8.7	-60.2
14	»	J_3	-8.7	-59.8
18	»		-8.6	-57.6
19	»	$\text{K}_2\text{-P}_1$	-7.9	-56.5
23	»	J_3	-7.7	-51.5
27	»	J_2	-6.6	-47.4
28	»	$\text{K}_2\text{-P}_1$	-9.3	-60.8
31	»	N_2	-8.5	-55
32	Скважина	$\text{P}_2\text{-N}_1$	-10.4	-69.2
33	Родник	$\text{K}_2\text{-P}_1$	-7.9	-53.6
35	»		-9.7	-61.6
37	Черное море		-1.8	-18.5

ческого состава. Химический состав вод и абсолютные концентрации солевой компоненты обусловлены и регулируются в первую очередь литологическим составом водовмещающих толщ, а также интенсивностью их растворения и длительностью взаимодействия. Наиболее распространенный тип вод – гидрокарбонатный-кальциевый с почти полным отсутствием других макрокомпонентов.

Воды региона содержат значительное количество $\text{C}_{\text{общ}}$ с абсолютными значениями, варьирующими от 27.2 до 81.8 мг/л, при этом преобладающая составляющая – $\text{C}_{\text{неорг}}$ (>80%). Содержание NO_3^- весьма неоднородно, максимальные значения (до 87.2 мг/л) характерны для рек, дренирующих породы таврической серии. Повышенная концентрация NO_3^- в них обусловлена либо антропогенным фактором – хозяйственной деятельностью на изучаемой территории, либо повышенным содержанием азота в минеральных фазах пород таврической серии. В остальных пробах содержание $\text{NO}_3^- \leq 10$ мг/л, что свидетельствует о низкой загрязненности природных вод по данному показателю.

Содержание микрокомпонентов весьма разнообразно: в сидерофильной группе значимые концентрации имеют железо (до 0.4 мг/л), кобальт (до 0.6 мкг/л), никель (до 7.261 мкг/л); среди халькофильных элементов – медь (до 19.24 мкг/л), цинк (до 52.84 мкг/л) и селен (2.252 мкг/л); среди литофильной группы – стронций (до 1.887 мг/л), барий (до 0.211 мг/л) и рубидий (до 3.143 мкг/л). Содержание галлия, мышьяка, серебра, кадмия, свинца, урана и тория весьма низкое – ниже их кларков для вод зон гипергенеза.

Общее количество $\text{PЗЭ}_{\text{раств}}$ невелико и составляет 0.033–0.199 мкг/л. Максимальная концентрация $\text{PЗЭ}_{\text{раств}}$ фиксируется в родниках, локализованных в терригенно-карбонатных отложениях мел-палеогенового возраста, а минимальные содержания диагностируются в подземных водах скважин. Повсеместно количество легких PЗЭ значительно больше, чем иттрия и тяжелых PЗЭ . Нормализованные по отношению к NASC тренды распределения PЗЭ достаточно пологи, что типично для пресных подземных вод, при этом для всех проб отчетливо проявляется положительная аномалия по европию, а для некоторых – по эрбию и по празеодиму, а также отрицательная

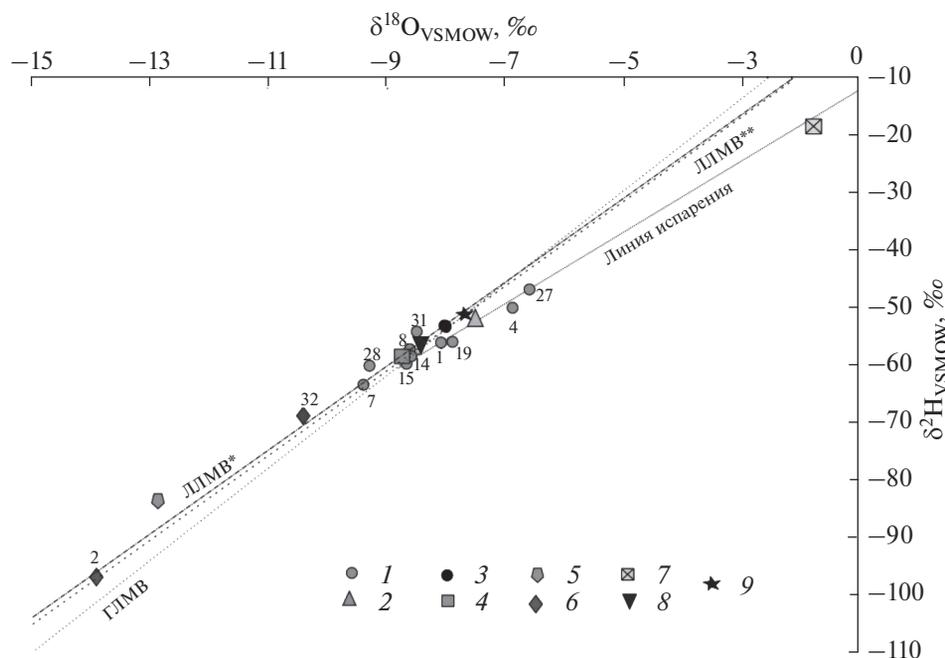


Рис. 9. Бинарная диаграмма соотношения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в природных водах юго-западной части Крымского п-ова. 1 – родники; 2 – р. Кача; 3 – источники Красной пещеры (по данным [4]); 4 – источники массива Ай-Петри (по данным [4]); 5 – подземные воды из блока верхнеюрских известняков, скважина (по данным [4]); 6 – подземные воды из скважин; 7 – воды Черного моря; 8 – источник Аян, г. Четырдаг (по данным [4]); 9 – источник Женский, Магуп-Кале (по данным [4]). Номера проб соответствуют номерам проб в табл. 3. ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод. Локальные линии метеорных вод (ЛЛМВ* и ЛЛМВ**) построены на основе уравнений из работы [19].

аномалия по церию, за исключением проб из скважин.

Подземные воды родников достаточно близки по изотопному составу, который типичен для атмосферных вод региона, при этом воды скважин имеют сильно облегченный состав. Полученные данные показывают, что подземные воды родников имеют метеорный генезис с преимущественно зимним питанием и области их загрузки располагаются на высотных отметках 800–1200 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амеличев Г.Н., Токарев И.В., Токарев С.В., Крайнюкова И.А., Бурлакова Н.С. Комплексная оценка возраста и установление условий формирования минеральных вод “Бишули” (Равнинный Крым) на основе изотопно-геохимических данных // Уч. зап. КФУ. География. Геология. 2017. Т. 3 (69). № 2. С. 130–150.
2. Восель Ю.С. Геохимия урана в современных карбонатных отложениях малых озер (формы нахождения и изотопные отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$). Автореферат дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Новосибирск: Ин-т геологии и минералогии СО РАН, 2015.
3. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1970. 364 с.
4. Дублянский Ю.В., Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Токарев С.В., Шпётль К. Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // Спелеология и карстология. Симферополь, 2012. № 9. С. 14–21.
5. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории города Севастополя в 2020 г. Вып. 3. Севастополь: ЭКОЦЕНТР, 2021. 116 с.
6. Каюкова Е.П. Формирование изотопного состава природных вод Горного Крыма под влиянием естественных процессов // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. 2016. № 2. С. 11–26.
7. Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г., Устюгов Д.Л., Гребнева А.В. Пресные воды Крыма // Геология и недропользование. 2021. № 1. С. 92–103.
8. Маршруты Крымской учебной практики по Общей геологии: учебное пособие / Под ред. Р.В. Веселовского, М.А. Романовского, Н.И. Косевич, А.И. Гущина. М.: КДУ, Добросвет, 2021. 215 с.
9. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972.
10. Попов В.Г., Абдрахманов Р.Ф. Геохимия и генезис содовых вод южного Урала и Предуралья // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. 2010. № 8. С. 228–231.
11. Пугач Л.С., Кокорева С.В. Создание комплектов гидрогеологических и инженерно-геологических карт масштаба 1 : 1 000 000 по группе листов терри-

- тории Российской Федерации в 2017–2019 гг. М.: Гидроспецгеология, 2019.
12. Савенко В.С. О соотношении биогенной и терригенной взвеси в океане / Под ред. В.С. Савенко // ДАН. 1999. № 7. С. 985–997.
 13. Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 371 с.
 14. Токарев С.В., Токарев И.В., Амеличев Г.Н. Изучение условий питания водоносных комплексов в неогеновых отложениях Равнинного Крыма с использованием метода стабильных изотопов // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2017. Т. 3 (13). № 4. С. 78–90.
 15. Харитонова Н.А., Вах Е.А., Челноков Г.А., Чудаев О.В., Александров И.А., Брагин И.В. Геохимия редкоземельных элементов в подземных водах Сихотэ-Алинской складчатой области (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. № 2. С. 68–82.
 16. Юдин В.В. Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. 336 с.
 17. Appelo C.A., Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam: Balkema A.A., 1994. 536 p.
 18. Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Langhamer L., Spötl C. Stable isotopic composition of atmospheric precipitation on the Crimean Peninsula and its controlling factors // J. Hydrol. V. 565. 2018. P. 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.006>
 19. Dublyansky Y.V., Spötl C., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N. Groundwater of the Crimean peninsula: a first systematic study using stable isotopes // Isotopes Environ. Health Studies. 2019. Т. 55. № 5. С. 419–437.
 20. Gustafsson J.P. Visual MINTEQ. Version 3.1. Stockholm, 2013. <https://vminteq.lwr.kth.se/download/>
 21. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3 – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geological Survey Techniques and Methods. 2013. V. 6. A43. 497 p.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 556.3;550.46;551.50

**ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМОВ БАСЕЙНА
РЕКИ БОДРАК (СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ СКЛОН КРЫМСКИХ ГОР)¹**© 2022 г. Е. П. Каюкова^а, *, Н. А. Харитоновна^б, Е. А. Филимонова^б, М. В. Чарыкова^а^аСанкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, 199134 Россия^бМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991 Россия

*e-mail: epkayu@gmail.com

Поступила в редакцию 23.12.2021 г.

После доработки 16.02.2022 г.

Принята к публикации 28.02.2022 г.

При исследовании основных факторов формирования химического и изотопного состава поверхностных вод открытых водоемов (ставков) бассейна р. Бодрак использованы гидрохимические и изотопные методы. Отдельное внимание отведено изучению дождевых вод, поскольку химический и изотопный состав атмосферных осадков, а также их количество имеют большое значение при изучении геохимических особенностей и водного баланса поверхностных водоемов. Работа базируется на фактическом материале, полученном во время долгопериодических наблюдений: гидрохимический мониторинг проводилось в течении 2003–2007 гг., а изотопное опробование ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) осуществлялось с 2012 по 2018 гг. Анализ данных показывает, что химический и изотопный состав поверхностных вод изучаемой территории зависит от количества атмосферных осадков и паводковых вод, метеоусловий, геолого-гидрогеологической обстановки, обуславливающей притоки подземных вод, и антропогенных факторов.

Ключевые слова: атмосферные осадки, поверхностные воды, химический состав, стабильные изотопы, Горный Крым.

DOI: 10.31857/S0321059622040083**ВВЕДЕНИЕ**

Собственные водные ресурсы Крыма весьма ограничены, и их всегда было недостаточно для покрытия питьевых и хозяйственных нужд полуострова. До 2014 г. значительная часть воды (2400 млн м³) поступала по Северо-Крымскому каналу из Днепра и только 500 млн м³ давали местные реки и подземные воды [2].

В настоящее время проблема питьевой воды в Крыму стоит остро как никогда, хозяйственно-питьевое водоснабжение Республики Крым обеспечивается преимущественно из собственных подземных и поверхностных источников. В связи с этим количественные и качественные характеристики существующих на полуострове локальных пресных вод, от которых зависит санитарно-эпидемиологическое благополучие местного на-

селения, нуждаются в тщательном изучении и мониторинге.

В государственном докладе “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Республике Крым” за 2019 г. сообщается, что доля населения, получающего качественную питьевую воду по Крыму в целом, составляет 74.1%, однако в Бахчисарайском районе ситуация гораздо лучше – 97.1%. Это связано с тем, что здесь верховья рек, в том числе и истоки р. Бодрак, формируются на необжитых заповедных территориях.

На естественный речной сток действуют в первую очередь метеофакторы – осадки, температура приземного воздуха (влияющая на испарение), роза ветров, а также геоморфологические и геолого-гидрогеологические условия и растительность.

Режим крымских рек – паводочный, для его сохранения и дальнейшего использования в хозяйственно-питьевых целях в долинах рек по балкам и оврагам строят водоемы (местное название –

¹ Работа Н.А. Харитоновой и Е.А. Филимоновой выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9).

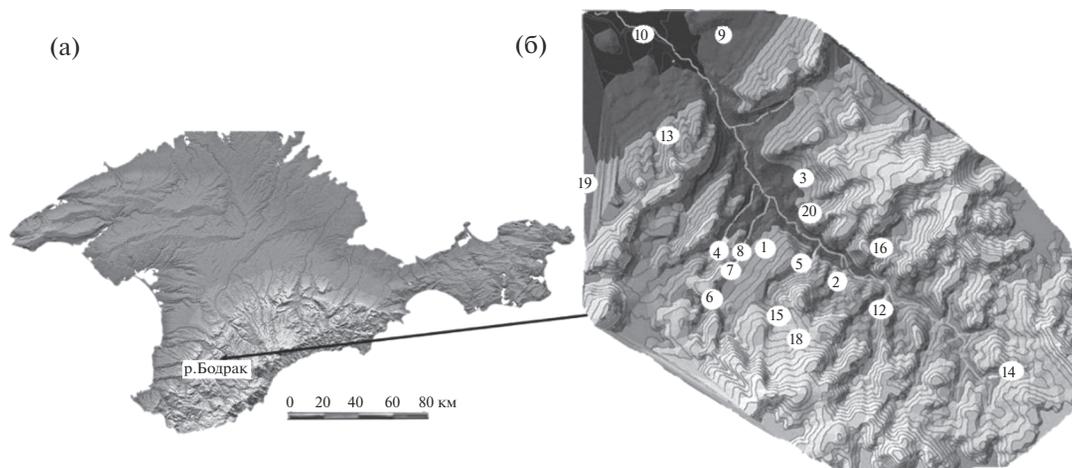


Рис. 1. Район работ: а – обзорная карта; б – рельеф бассейна р. Бодрак с точками опробования открытых водоемов (ставков). Водоемы: 1 – Воронежский (на склоне г. Патиль), 2 – Ексиментий, 3 – Колхозный, 4 – Ленинградский (Шары), 5 – Мангушский, 6 – Мендер (верховья Московского оврага), 7 – Мендер (А), 8 – Мендер (В), 9 – Мраморный, 10 – Скалистое (у дороги), 12 – Широкий Яр, 13 – Корабелка, 14 – Кагульчик, 15 – Юркин (под г. Шелудивой), 16 – Музачи (Музаран), 18 – Верхнесадовый, 19 – Глубокий Яр, 20 – Аммонитовый.

ставки). Эти воды играют важную роль в гидрологическом цикле.

В настоящее время, когда водохозяйственный комплекс Крыма ориентируется на собственные ресурсы, изучение формирования химического и изотопного состава природных вод приобрело особое значение. Знания об условиях формирования и механизмах трансформации химического состава водных ресурсов территории дает возможность проводить полноценную оценку качества хозяйственно-питьевых вод [12], выявлять очаги загрязнения и природные аномалии. Сведения об изотопном составе природных вод позволяют прогнозировать отдельные трудно поддающиеся измерениям элементы водного баланса (такие, как испарение и подземный сток), изучать климатические изменения, вносить коррективы при управлении водными ресурсами территории.

Первые гидрохимические исследования подземных и поверхностных вод в восточной части Бахчисарайского района Крыма проводились преподавателями Московского государственного университета в конце 1990-х гг. Содержания основных анионов и катионов были получены объемным методом (натрий и калий суммарно расчетным путем) [18]. Существенный вклад в изучение пресных вод, используемых в питьевых целях, внесли Т.А. Барабошкина и В.Ю. Березкин при эколого-геологическом картографировании бассейна р. Бодрак [3].

К началу XXI в. полигон, хорошо изученный в геологическом отношении, был существенно недообследован в гидрогеологическом отношении.

К этому времени появилась потребность не только в понимании гидрогеологических условий, но и в оценке качества пресных вод, используемых в питьевых целях. С 1998 г. на постоянной основе преподавателями и студентами Санкт-Петербургского государственного университета проводится комплексное изучение природных вод бассейна р. Бодрак, ведется мониторинг их экологического состояния [8, 10, 22].

В начале 2000-х гг. впервые были получены данные по концентрациям целого ряда микрокомпонентов и соединений азота в пресных водах района с использованием современных инструментальных методов.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования находится на северо-западных склонах Крымских гор в долине р. Бодрак, протекающей в пределах Бахчисарайского района Крыма мимо с. Трудолюбовка и пос. Скалистого до пос. Новопавловка, где она впадает в р. Альму, текущую на 3 к Черному морю (рис. 1). В зависимости от направления стока поверхностных вод все реки Крымского п-ова делятся на пять групп; р. Альма относится к рекам северо-западных склонов Крымских гор, впадающих в Черное море.

Горная часть Крымского п-ова представляет собой три гряды, протянувшиеся с ЮЗ на СВ вдоль берега Черного моря. Крымское предгорье – Вторая (Внутренняя) и Третья (Внешняя) гряды – окаймляет Главную гряду с северной стороны.

Предгорья – область питания артезианских бассейнов равнинного Крыма. Протяженность Внутренней гряды – 125 км, средние высоты – 400–600 м, протяженность Внешней гряды – 114 км, средние высоты – 200–300 м [2].

В пределах Второй (Внутренней) гряды преобладает структурный куэстовый рельеф, обусловленный эрозионным расчленением мел-палеогеновых песчано-глинистых и карбонатных отложений различной прочности, широко развиты холмы, столовые плато, овраги, малые реки и временные водотоки. Наибольшую высоту в юго-западном Крыму имеет г. Сель-Бухра (656 м) [13], относительные превышения достигают 100 м. Внутренняя и Внешняя гряды отделены друг от друга Северным эрозионно-аккумулятивным межгрядовым понижением, возникновение которого обязано врезанием в мягкие породы верхнего эоцена боковых притоков, пересекающих понижение в поперечном направлении.

Бассейн р. Бодрак занимает площадь в пределах Внутренней предгорной гряды Крымских гор и Южного эрозионно-денудационного межгрядового понижения на северо-западном крыле Качинского поднятия. Вторая гряда представляет собой хребет с куэстовым рельефом, расчлененный речными долинами, оврагами и балками.

Южное межгрядовое понижение – сложная сеть оврагов и балок, сформированных в результате глубокой эрозии песчано-сланцевых триасово-юрских и частично среднеюрских отложений, обнажающихся на северных склонах Главной гряды [14].

Истоки р. Бодрак формируются на юго-западных склонах хребта Азарпсырт (абс. отм. – 560 м) и северных склонах г. Вольской (абс. отм. – 486 м). Рельеф здесь холмистый, расчлененный многочисленными оврагами и балками постоянных и временных водотоков, преобладают узкие водоразделы. Русло р. Бодрак линейно вытянуто с уклоном в верхнем течении 28‰, заложение долины происходило преимущественно по зонам трещиноватости и тектонических нарушений.

Все крымские реки зарегулированы. В долинах рек существуют водохранилища и ставки (пруды) – небольшие искусственно созданные водоемы сезонного регулирования для накопления и сохранения дождевых и паводковых вод с целью дальнейшего использования в водохозяйственных целях. Ставки в местных условиях строят главным образом путем перегораживания балок, наполнение их осуществляется за счет стока воды с водосборной поверхности в период весеннего снеготаяния и интенсивных дождевых осадков.

Ставки имеют специальные конструкции, которые позволяют при необходимости (в засушливый период) сливать воду и таким образом питать подрусловой поток р. Бодрак. Это в свою очередь

отражается на уровне воды в местных водозаборных сооружениях.

Общая площадь зеркала водоемов (ставков) бассейна р. Бодрак ~30 га. Существует около двух десятков водоемов сезонного регулирования, наиболее значительные из них – Мангушский, Воронежский, Широкий Яр, Эксиментий, Мендер, Колхозный, Юркин, Кагульчик. В них собирается большая часть поверхностного стока зимне-весеннего периода, которая может использоваться в маловодные летне-осенние периоды. Дополнительно у преобладающей части водоемов существует подземный тип питания.

Самый крупный ставок – Мраморный (или Марсианское озеро) – весьма интересный гидрогеологический объект. Водоем образовался в 1999 г. в бывшем карьере нуммулитовых известняков. В 1990-х гг. здесь шла добыча инкерманского известняка, разработка проводилась открытым способом, трещинные воды, поступающие в карьер в процессе резки блоков, периодически откачивали.

В настоящее время Мраморный ставок используется в рекреационных целях. Водоем представляет собой прямоугольник размером 200 × 400 м, средняя глубина его 15–18 м. С глубиной температура воды резко понижается (до 3–5°C) за счет действующих на глубине многочисленных источников, самый мощный из которых функционирует в юго-восточной части водоема. Озеро зимой никогда не замерзает. Вмещающие отложения представлены слабо закарстованными массивными органогенными нуммулитовыми известняками лютетского яруса среднего эоцена.

Геолого-гидрогеологические условия

Исследуемая территория находится в зоне сочленения двух основных региональных тектонических структур Крымского п-ова – Горно-Крымского складчатого сооружения и эпигерцинской Скифской платформы [1].

Нижний структурный этаж (ядро Качинского поднятия) сложен триасово-юрскими интенсивно дислоцированными комплексами. В составе нижнего структурного этажа выделяют три структурно-фациальных подэтажа: один представлен сложноскладчатыми флишами (в основном опрокинутого залегания) таврической серии (T_3-J_1), второй – тектонически раздробленными флишидами (T_3-J_1), третий – дислоцированным вулканогенно-осадочным комплексом (J_2b) мощностью >1500 м (рис. 2).

Верхний структурный этаж (северо-западное крыло Качинского поднятия) с резким угловым несогласием перекрывает нижний. В целом это моноклиналь, сложенная терригенно-карбонатными породами мелового и палеогенового воз-

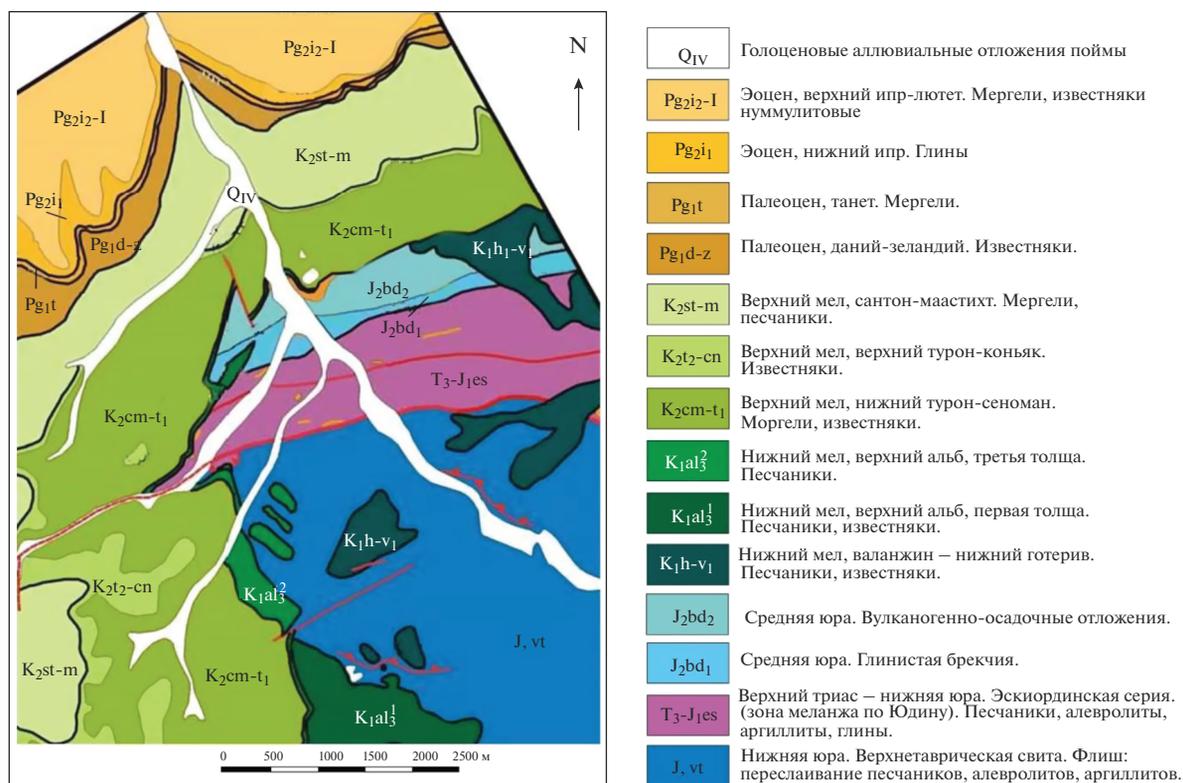


Рис. 2. Геологическая схема района исследования, по материалам [4].

раста, падающая полого на СЗ под углами 8°–12°. В структуре этажа наблюдается ряд угловых и азимутальных несогласий.

Главная гряда служит внешней областью питания артезианских бассейнов Равнинного Крыма. Внутренняя и Внешняя гряды расположены в краевых частях южных крыльев артезианских бассейнов, они играют роль внутренней области питания. Внутренняя гряда сформирована породами мел-палеогенового возраста (известняки, мергели, глины); Внешняя гряда – отложениями неогенового возраста. Обе гряды имеют характерный куэстовый рельеф.

В.В. Юдиным здесь выделены коллизионные швы (сутуры): Предгорная мезозойская и Северо-Крымская палеозойская. Асимметричные гряды в Крымском предгорье из слабодислоцированных толщ мел-неогенового возраста названы Куэстовой моноклиналью [23].

Климат

По данным метеостанции г. Симферополя, за последние 40 лет температура воздуха менялась в среднем на +0.3°С каждые 5 лет, что связано с глобальными климатическими изменениями; вероятно, в ближайшие годы тенденция сохранится.

На рис. 3 показаны метеоданные (среднегодовые значения температуры приземного воздуха и среднегодовые суммы осадков, доли от годовой нормы, %) за последние 20 лет.

За норму годового количества осадков взяты их среднегодовые величины за 130 лет наблюдений на метеостанции г. Симферополя (524 мм) [15]; за климатическую норму температуры – среднее ее значение за период 1961–1990 гг. (+10.3°С) [6].

В течение четырех лет после 2014 г. метеоусловия в Крыму благоприятствовали формированию естественного стока. Однако в 2019 г. осадков выпало на 20% меньше нормы, и это отразилось на формировании объема естественных водных ресурсов: снега и жидких осадков оказалось недостаточно для полноценного заполнения водохранилищ естественного стока и многочисленных ставков в предгорьях Крыма.

В крымском Предгорье в последние десятилетия наблюдаются рост потепления и колебание увлажнения территории (причем благополучных по водности лет случается гораздо меньше). В последнее десятилетие температура приземного воздуха держится на 20% выше нормы 1961–1990 гг. с устойчивой тенденцией к увеличению на 1.5–2.0% в год (рис. 3), по данным метеостанции г. Симферополя [15].

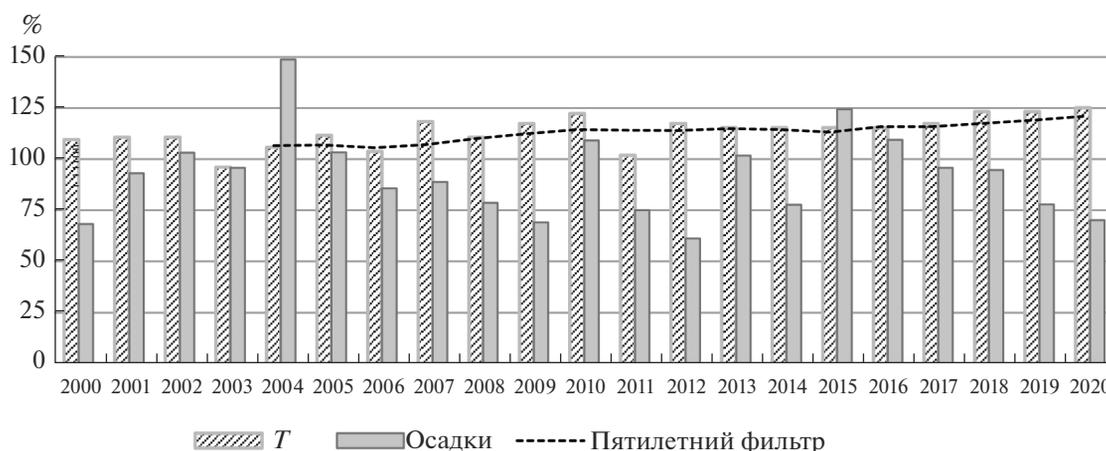


Рис. 3. Изменение температуры приземного воздуха T и количества осадков за период 1961–1990 гг., % нормы (по данным метеостанции г. Симферополя, индекс 33946 [15]).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе представлены данные по химическому и изотопному составу поверхностных вод открытых водоемов. С 2003 по 2007 г. было проведено 34 опробования поверхностных вод из ставок бассейна р. Бодрак на микро- и макрокомпоненты. Изучение изотопного состава проводилось с 2012 по 2018 г. Все опробования проводились в летний сезон.

Температура и pH были измерены с использованием портативных приборов фирмы “HANNA” непосредственно у водопункта. Пробы воды на макрокомпоненты отбирались в пластиковые бутылки объемом 1.0–1.5 л. Концентрации Cl^- , HCO_3^- измерены в лаборатории базы СПбГУ в Крыму объемным методом. Содержание SO_4^{2-} определяли: весовым методом в лаборатории кафедры гидрогеологии СПбГУ и методом турбидиметрии на портативном колориметре DR/890 Nach. Содержание микрокомпонентов (29 компонентов) и основных катионов определяли методами ICP AES (атомно-эмиссионный спектрометр ICAP61E) и ICP MS (масс-спектрометр “Agilent 7500”) в лаборатории ГУП “Водоканал”. Пробы предварительно консервировали азотной кислотой из расчета на 50 мл пробы 1 мл азотной кислоты (2%).

Определение изотопного состава водорода и кислорода выполнялось в лаборатории изотопной геологии флюидов (ЛИГФ) СПбГУ и рентгенодифракционных методов исследований (РДМИ) Научного парка СПбГУ. Для измерений использовался лазерный анализатор изотопного состава воды “Picarro L-2120-I”. Погрешность измерений составляет $\pm 0.1\%$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 1\%$ по δD . В качестве стандартов использованы внутрилабораторные образцы сравнения, привязанные к стандар-

там МАГАТЭ V-SMOW-2, GISP и SLAP. Пробы воды для изотопного анализа отбирались в пробирки 10–20 мл.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химический состав открытых водоемов (ставков) бассейна р. Бодрак зависит от ряда факторов — состава атмосферных осадков, паводковых вод, метеоусловий в течение года, подземных вод, антропогенных факторов.

Ионный состав атмосферных осадков характеризуется пестротой, однако в летние месяцы главную роль из анионов играют гидрокарбонаты, а из катионов — обычно кальций (90% всех изученных проб). Средние эквивалентные концентрации имеют следующую последовательность: для анионов — $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, для катионов — $\text{Ca}^{2+} > (\text{Mg}^{2+} \text{ или } \text{Na}^+) > \text{K}^+$.

Среди всех макрокомпонентов только содержания кальция в наибольшей степени зависят от продолжительности и интенсивности выпадения осадков (что связано с запыленностью атмосферы в летний период). Его концентрации ощутимо меняются при пересчете на средневзвешенные количества, так как короткие летние дожди более минерализованы за счет наличия пылеватых частиц в атмосфере [7].

Исследованные воды открытых водоемов имеют низкую минерализацию, варьирующую от 0.1 до 0.8 г/л (табл. 1), которая сильно колеблется даже в пределах одного ставка в зависимости от сезона и года опробования. Наименее минерализованный — ставок Кагульчик в верховьях р. Бодрак. Минерализацию поверхностных вод обуславливают главным образом количество атмосферных осадков, выпавших за гидрологический год, тем-

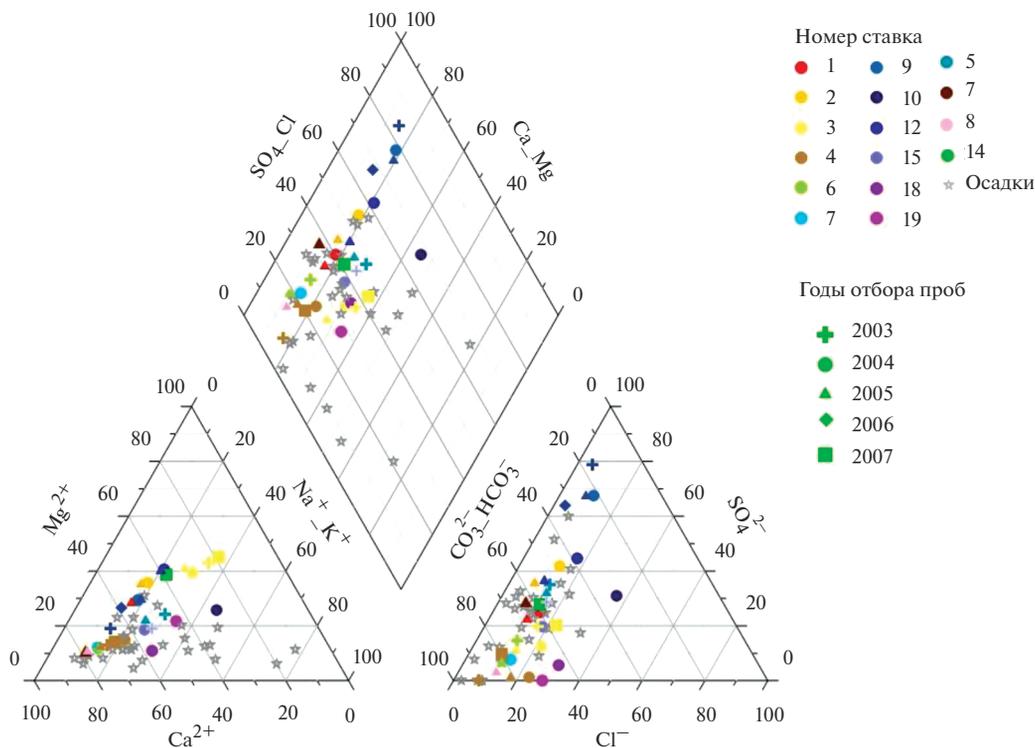
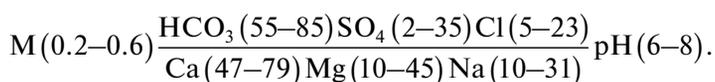


Рис. 4. Химический состав дождевых и поверхностных вод на диаграмме Пайпера. Номера точек опробования соответствуют водоемам на рис. 1 и в табл. 1.

пература в летний период (обеспечивающая испарение) и притоки подземных вод.

pH изученных вод меняется от 5.40 до 8.54, и минимальное значение зафиксировано в ставке Воронежском в 2005 г. В целом, воды всех ставок — нейтральные или слабощелочные.

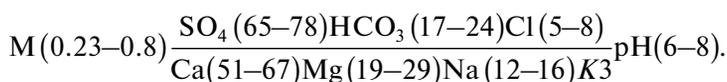
По своему ионному составу поверхностные воды ставок разнообразны, в большинстве своем это воды умеренно жесткие сульфатно-гидрокарбонатно-магниево-кальциевого или гидрокарбонатно-кальциевого состава:



В ставках, расположенных ближе к верховьям р. Бодрак, содержание ионов Mg (в эквивалент-процентах) выше, чем в ставках, расположенных в среднем течении реки. В ставке Кагульчик, расположенном в верховьях, концентрации Mg^{2+} и Ca^{2+} равны.

Химический состав поверхностных вод представлен на диаграмме Пайпера (рис. 4), из которой видно, что фигуративные точки ставок и

атмосферных осадков располагаются в одной области. Это указывает на идентичность их химического состава и свидетельствует о преобладании дождевого питания в водном балансе водоемов. На общем фоне выделяются воды Мраморного ставка, расположенного в бывшем карьере нумулитовых известняков (п. Скалистое). Здесь в анионном составе преобладают сульфаты:



Практически двухкратное превышение содержания сульфат-иона по сравнению с другими во-

доемами бассейна р. Бодрак объясняется значительной долей подземного питания — за счет

Таблица 1. Макрокомпонентный состав открытых водоемов бассейна р. Бодрак

Код точки	Дата от пробования	Место отбора пробы	pH	Минерализация (расчетная)		Жесткость мг-экв/л	мг/л							
				г/л	SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	
1	01.06.2003	Воронежский	8.20	—	—	3.60	—	—	—	15.0	1.7	49.0	14.0	3.9
	10.07.2004		8.54	0.24	40.31	2.74	—	17.7	13	1.4	35	12	—	—
2	11.07.2005	Ексиментий	—	0.28	40.10	3.17	152.5	17.0	14.0	1.4	42.0	13.0	25.2	—
	01.06.2004		7.93	0.44	125.04	5.07	170.8	28.4	25	1.8	57	27	—	—
3	03.07.2005	Колхозный	7.30	0.61	144.52	7.11	292.8	24.9	31.0	2.0	83.0	36.0	2.5	—
	01.06.2003		8.40	0.62	78.82	5.62	329.4	51.1	57.0	15.0	40.0	44.0	23	—
4	01.06.2004	Ленинградский	8.36	0.57	48.22	5.48	317.2	60.28	47	15	47	38	6.88	—
	11.07.2005		6.50	0.56	38.71	5.44	341.6	39.1	41.0	11.0	48.0	37.0	70.0	—
5	01.07.2007	Мендер	—	0.45	60.64	4.02	219.6	51.12	44.3	14	24	34.4	—	—
	01.06.2003		7.70	—	—	2.06	170.8	8.5	9.2	0.2	35.0	3.8	32.5	—
6	01.06.2004	Мендер	7.41	0.16	1.14	1.67	97.6	17.7	10	0.66	27	3.9	11	—
	11.07.2005		6.00	0.22	0.80	2.50	146.4	18.8	9.9	0.8	43.0	4.2	14.2	—
7	05.07.2007	Мангуш	—	0.16	10.21	1.83	109.8	8.52	9.16	0.95	30	3.83	—	—
	01.06.2003		8.20	0.50	114.87	4.84	219.6	31.2	36.0	18.0	64.0	20.0	29	—
8	01.06.2004	Мендер (А)	8.22	0.38	178.60	4.12	48.8	42.5	28	15	56	16	24.1	—
	03.07.2005		7.00	0.54	110.56	5.51	244.0	35.9	32.0	16.0	79.0	19.0	26.6	—
9	01.06.2003	Мраморный	7.44	0.33	29.66	3.74	195.2	19.9	13.0	2.7	65.0	6.0	41	—
	01.06.2004		7.59	—	—	6.20	366	31.9	15	0.95	110	8.5	14	—
10	11.07.2005	Мендер (В)	7.00	0.49	18.11	5.67	317.2	28.0	15.0	1.5	100.0	8.2	6.3	—
	01.06.2004		7.50	0.37	17.83	4.18	231.8	24.8	15	1.3	72	7.1	8.1	—
12	11.07.2005	Мраморный	7.00	0.52	93.45	6.17	268.4	22.0	17.0	2.0	110.0	8.2	2.7	—
	27.07.2005		7.00	0.47	7.32	5.37	317.2	26.6	16.0	1.5	95.0	7.5	—	—
14	01.06.2003	Широкий Яр	8.10	0.58	264.4	10.22	122.0	19.9	33.0	12.0	86.7	27.0	7.1	—
	01.06.2004		8.20	0.63	299.51	7.56	122	35.5	32	11	97	33	3.1	—
15	03.07.2005	Кагульчик	7.00	0.56	262.59	6.58	122.0	25.6	31.0	10.0	84.0	29.0	4.6	—
	21.07.2006		—	0.51	231.23	6.01	122	19.88	26	9.3	79	25	—	—
18	01.06.2004	Верхнесадловый	—	0.50	109.56	4.04	146.4	95.7	73	6.4	43	23	—	—
	01.06.2004		7.80	0.36	112.46	4.14	122	31.9	24	2.3	40	26	—	—
19	03.07.2005	Глубокий Яр	6.80	0.43	104.05	4.78	195.2	23.4	27.0	2.6	48.0	29.0	2.5	—
	30.06.2007		—	0.22	40.61	2.36	109.8	14.91	14.9	2.0	24	14.4	—	—
19	01.06.2003	Юркин	7.45	0.52	95.87	5.12	244.0	38.3	38.0	12.0	76.0	16.0	12.4	—
	01.06.2004		7.33	0.52	67.04	5.27	268.4	46.1	35	12	79	16	14.3	—
19	01.06.2004	Глубокий Яр	7.00	0.60	21.91	5.55	317.2	88.6	48	20	93	11	—	—
	01.06.2004		8.38	—	—	2.47	170.8	39	17	21	33	10	—	—

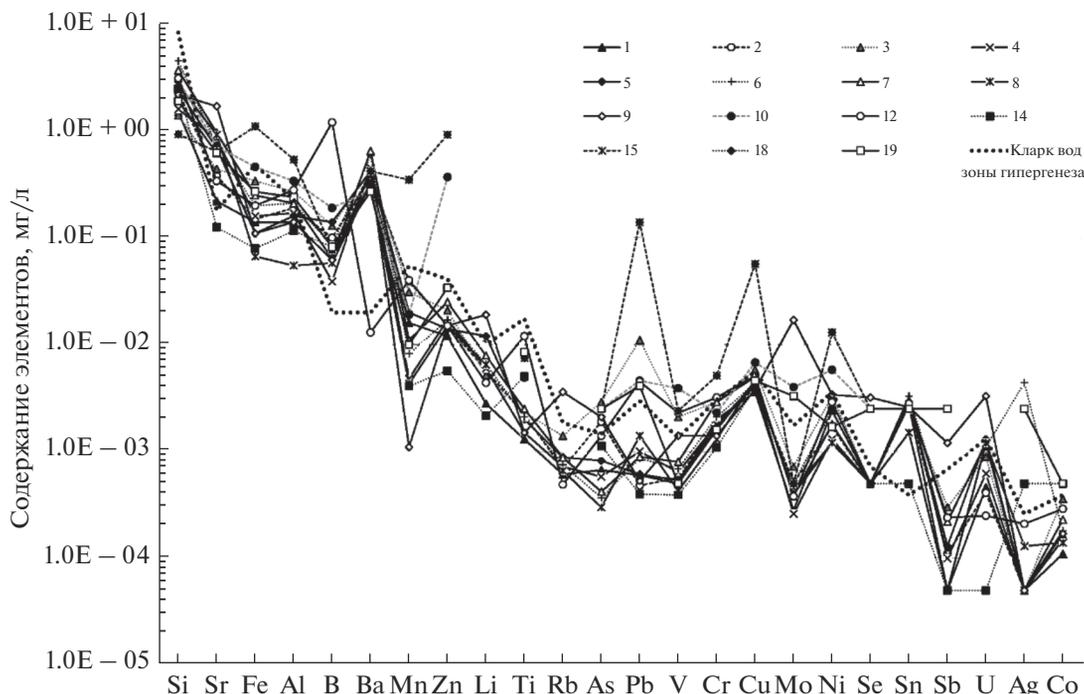


Рис. 5. Содержание отдельных компонентов в поверхностных водах открытых водоемов исследованной территории. Данные опробования 2005 г. Линия кларка элемента в водах зоны гипергенеза построена по данным работы [21]. Номера точек соответствуют данным табл. 1 и рис. 1.

трещинно-жильных вод известняков среднего эоцена.

Особое место на диаграмме занимает ставок, расположенный у трассы в нижнем течении р. Бодрак у пос. Скалистого (точка 10), за счет повышенной доли хлорид-иона (относительно концентраций в других водоемах). Этот ставок испытывает серьезную антропогенную нагрузку (на это указывает геохимическая ассоциация, речь о которой пойдет далее), и хлориды в данном водоеме имеют техногенное происхождение.

Содержание нитратов в водах практически всех ставок на изучаемой территории ниже нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения [16, 17]. Лишь в Колхозном ставке выявлено однократное превышение в 2 раза (табл. 1) при ПДК 40 мг/л, что объясняется периодическими сливами со свинофермы, которая располагается непосредственно у водоема. При этом в большинстве ставок концентрации нитратов выше фоновых в 3–4 раза, и это характерно для сельскохозяйственного района.

Микроэлементный состав исследованных вод весьма разнообразен и приведен в табл. 2 и на рис. 5. Каждый ставок характеризуется водой с индивидуальным набором микрокомпонентов, который контролируется преимущественно локальным геолого-гидрогеологическим строением

территории, где располагается открытый водоем, количеством осадков и величиной испарения.

Концентрации кремния в исследуемых водоемах невысокие, средние значения составляют 2.7 мг/л и варьируют в широких пределах (0.5–7 мг/л): минимальные значения обнаружены в ставке Колхозном, а максимальные в ставке Мендер. В целом, концентрация кремния в водах ставок ниже, чем кларк кремния в водах зоны гипергенеза (8.36 мг/л) (рис. 5). Проведенный мониторинг в течение нескольких лет показывает, что содержание кремния меняется в зависимости от года опробования и места локализации открытого водоема. Максимальные концентрации кремния выявлены во всех ставках в пробах, отобранных в 2004 г. (табл. 2).

Концентрации бора в исследуемых водоемах невысокие – от 0.02 до 1.2 мг/л при среднем значении 0.15 мг/л, которое выше, чем кларк элемента в водах зоны гипергенеза (0.02 мг/л) (рис. 5). Концентрации этого элемента 1.2 и 1.0 мг/л, превышающие ПДК для водных источников (0.5 мг/л), обнаружены в водах двух ставок – Широкий Яр и Юркин соответственно. Источники повышенных концентраций B^{3+} в этих ставках – вероятно, подземные воды, извлекающие бор из осадочных водовмещающих толщ.

Содержания железа сильно варьируют в зависимости от точки и года опробования, но, в це-

Таблица 2. Микрокомпонентный состав открытых водоемов бассейна р. Бодрак

Код точки	Дата опробования	мг/л										мкг/л										Ag	Co			
		Si	Sr	Fe	Al	B	Va	Mn	Zn	Li	Ti	Rb	As	Pb	V	Cr	Cu	Mo	Ni	Se	Sn			Sb	U	
1	01.06.2003	1.2	0.28	0.20	0.11	0.061	0.02	0.016	0.056	—	5.0	—	2.5	0.5	0.5	0.5	1.2	0.5	1.6	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	1.1
	10.07.2004	2.7	0.22	0.03	0.15	0.065	0.01	0.002	0.022	—	1.9	—	2.5	2.3	0.5	0.5	4.0	0.5	0.5	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	11.07.2005	1.5	0.22	0.14	0.14	0.062	0.33	0.016	0.012	—	2.8	0.6	0.7	0.6	0.5	2.0	3.6	0.28	2.4	0.5	2.7	0.05	0.46	—	—	0.05
2	01.06.2004	2.4	0.29	0.03	0.15	0.096	0.02	0.005	0.022	—	1.9	—	2.5	4.6	0.5	0.5	4.9	0.5	0.5	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	03.07.2005	2.3	0.38	0.15	0.19	0.100	0.37	0.039	0.015	5.8	2.2	0.7	1.9	0.5	0.6	1.8	4.0	0.5	1.7	0.5	2.7	1.1	0.41	—	0.05	0.2
	01.06.2003	0.5	0.50	0.26	0.17	0.140	0.05	0.046	0.031	—	0.5	—	2.5	0.5	2.4	0.5	1.2	1.2	3.0	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
3	01.06.2004	3.1	0.48	0.19	0.29	0.140	0.04	0.017	0.023	—	4.1	—	2.5	2.0	2.1	0.5	5.5	0.5	1.9	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	11.07.2005	1.4	0.44	0.34	0.27	0.130	0.43	0.031	0.021	5.2	2.3	1.4	2.9	11.0	2.1	2.9	5.8	0.72	3.3	0.5	2.7	0.3	0.89	—	0.05	0.4
	01.07.2007	1.6	0.39	1.47	0.95	0.173	0.30	0.177	0.011	5.8	5.0	—	4.8	2.0	5.1	2.3	4.7	0.4	5.1	0.5	0.5	0.15	0.85	—	0.5	1.1
4	01.06.2003	1.3	0.85	0.22	0.02	0.028	0.13	0.004	0.013	—	0.5	—	2.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	4.2	0.77	0.07	0.23	0.034	0.13	0.006	0.021	—	2.9	—	2.5	2.6	0.5	0.5	4.5	0.5	1.1	2.5	2.5	2.5	—	—	15.0	0.5
	11.07.2005	1.6	0.84	0.16	0.17	0.039	0.45	0.005	0.017	6.0	1.5	0.7	0.6	1.0	0.6	1.8	4.3	0.26	1.3	0.5	3.2	0.1	0.62	—	0.05	0.2
5	05.07.2007	1.3	0.95	0.14	0.15	0.070	0.40	0.003	0.025	5.3	5.0	—	0.6	0.64	0.6	0.88	3.8	0.23	1.8	0.5	0.5	0.14	0.69	—	0.5	0.17
	01.06.2003	1.6	0.70	0.82	0.35	0.130	0.05	0.030	0.120	—	4.4	—	2.5	1.7	1.5	1.8	1.2	0.5	2.4	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	3.8	0.55	0.20	0.24	0.130	0.03	0.091	0.085	—	3.1	—	2.5	3.4	0.5	0.5	5.8	0.5	1.2	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
6	03.07.2005	2.4	0.69	0.11	0.16	0.140	0.42	0.020	0.014	12.0	2.0	0.9	0.8	0.6	0.5	1.7	4.2	0.44	1.2	0.5	2.9	0.13	1.3	—	0.05	0.2
	01.06.2003	2.6	0.91	0.02	0.01	0.043	0.26	0.003	0.002	—	0.5	—	2.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	7.0	0.74	0.87	1.00	0.077	0.20	0.025	0.400	—	26.0	—	2.5	6.5	1.8	2.3	8.4	0.5	32.0	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
7	11.07.2005	4.5	0.73	0.20	0.21	0.084	0.59	0.008	0.017	6.6	2.1	0.8	0.4	0.9	0.7	2.1	4.4	0.39	1.8	0.5	3.3	0.23	1.1	—	4.4	0.2
	01.06.2004	2.7	0.82	0.06	0.16	0.063	0.30	0.003	0.025	—	0.5	—	2.5	1.7	0.5	0.5	1.9	0.5	1.5	2.5	2.5	2.5	—	—	84.0	0.5
	11.07.2005	3.7	0.96	0.25	0.21	0.064	0.65	0.011	0.025	7.9	2.5	0.9	0.4	0.9	0.8	2.9	5.0	0.38	1.8	0.5	3.0	0.22	1.2	—	0.05	0.2
8	27.07.2005	2.7	0.92	0.07	0.06	0.058	0.32	0.004	0.015	6.5	—	0.7	0.3	1.4	0.4	1.3	4.7	0.4	1.2	0.5	1.5	0.05	1.2	—	0.13	0.1
	01.06.2003	1.8	1.80	0.20	0.27	0.056	0.19	0.012	0.210	—	0.5	—	2.5	2.0	1.7	1.0	1.2	13.0	4.7	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	5.1	1.70	0.25	0.35	0.064	0.36	0.008	0.043	—	4.3	—	2.5	4.6	1.9	1.6	6.5	16.0	3.9	2.5	2.5	2.5	—	—	280.0	0.5
9	03.07.2005	2.2	1.70	0.11	0.14	0.062	0.40	0.001	0.015	19.0	1.5	3.6	2.1	0.5	1.4	1.4	3.8	17.0	3.4	3.2	2.6	1.2	3.3	—	0.05	0.2
	21.07.2006	4.3	2.10	0.29	0.23	0.086	0.71	0.006	0.086	16.0	4.4	1.4	2.5	10.0	1.5	1.6	9.1	16.0	5.2	6.2	0.5	1.9	—	—	0.15	0.24
	01.06.2004	3.0	0.72	0.46	0.34	0.190	0.28	0.019	0.370	—	4.9	—	2.5	4.6	3.9	2.3	6.8	4.0	5.8	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
10	01.06.2004	3.6	0.35	0.12	0.16	0.092	0.01	0.023	0.018	—	1.9	—	2.5	1.9	0.5	0.5	4.6	0.5	1.4	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	03.07.2005	3.1	0.34	0.20	0.28	1.200	0.01	0.040	0.015	4.4	12.0	0.5	1.4	4.5	2.3	3.2	5.1	3.8	2.9	0.5	2.8	0.24	0.25	—	0.21	0.3
	30.06.2007	2.5	0.13	0.08	0.12	0.082	0.32	0.004	0.006	2.2	5.0	—	1.1	0.4	0.39	1.1	4.0	0.5	2.4	0.5	0.5	0.05	0.05	—	0.5	0.5
14	01.06.2003	1.9	0.91	0.66	0.31	0.110	0.09	0.190	0.016	—	0.5	—	2.5	2.4	1.5	0.5	1.6	0.5	2.2	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	5.6	0.92	0.54	1.10	1.000	1.60	0.022	0.039	—	17.0	—	2.5	0.5	1.8	1.6	3.0	1.4	2.6	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	0.9	0.64	1.10	0.54	0.077	0.42	0.350	0.920	—	7.5	—	2.5	140	2.4	5.1	57.0	0.5	13.0	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
18	01.06.2004	0.9	0.64	1.10	0.54	0.077	0.42	0.350	0.920	—	7.5	—	2.5	140	2.4	5.1	57.0	0.5	13.0	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	1.9	0.62	0.27	0.24	0.082	0.27	0.010	0.034	—	8.5	—	2.5	4.1	0.5	1.6	4.6	3.3	1.7	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5

лом, для $Fe_{\text{общ}}$ характерны низкие значения, ≤ 1.5 мг/л (табл. 2), при среднем значении 0.3 мг/л. Минимальные концентрации железа, 0.02 мг/л, выявлены в ставке Мендер в пробе в 2003 г., однако при более поздних опробованиях количество $Fe_{\text{общ}}$ оказалось существенно выше – 0.2 (2005 г.) и 0.87 мг/л (2004 г.). Максимальные значения $Fe_{\text{общ}}$ (1.47 мг/л) зафиксированы в ставке Колхозном в пробе в 2007 г. В целом, для поверхностных вод ставков характерно превышение $Fe_{\text{общ}}$ относительно ПДК по рыбохозяйственным водоемам (0.1 мг/л) [16], на содержание элемента сильно влияет количество осадков и присутствие в водах органического вещества. В водоемах с высокой биологической продуктивностью наблюдается увеличение содержания железа.

Концентрации лития во всех изученных водах невысокие – 2.2–19.0 мкг/л, они практически равны кларку элемента в водах зоны гипергенеза (рис. 5). Только в двух ставках – Мраморном и Мангуш – выявлены воды с концентрациями лития более чем на порядок выше – 19.0 и 12.0 мкг/л соответственно. Незначительное количество данных по литию не позволяет выявить зависимости его содержания от минерализации.

Распределение стронция, рубидия и бария в водах ставков довольно хаотичное (рис. 5). Содержание Sr^{2+} варьирует от 0.12 до 2.10 мг/л при среднем значении 0.75 мг/л. Максимальные значения (2.1 мг/л) диагностированы в ставке Мраморном в пробе в 2006 г., а минимальные значения (0.13 мг/л) выявлены в ставке Кагульчик. Количество Rb^{+} достаточно низкое и составляет сотые и тысячные доли миллиграмма на литр, что ниже, чем кларк элемента в водах зоны гипергенеза (0.001 мг/л) [21]. Наибольшими концентрациями характеризуются поверхностные воды ставка Мраморного (до 3.6 мкг/л), во всех остальных водах содержания Rb^{+} примерно одинаковые. Повышенные содержания рубидия и стронция в водах ставка Мраморного, вероятно, обусловлены повышенной концентрацией элементов в водовмещающих толщах и их привнесом подземными источниками.

Диапазон вариативности содержания бария достаточно велик и составляет 0.01–1.6 мг/л (табл. 2; рис. 5). В целом, количество Ba^{2+} в исследованных водах выше, чем кларк элемента в водах гипергенеза, – 0.02 мг/л. Для всех открытых водоемов выявлены значительные колебания содержания элемента в зависимости от года опробования. Наибольшие концентрации элемента отмечены в пробах в 2005 г. (~1.2 мг/л) и установлены в водах ставка Юркин, расположенного у г. Шелудивой.

Марганец обнаружен в концентрациях ≤ 0.35 мг/л при среднем значении 0.04 мг/л. Наиболее высокие концентрации этого элемента обнаружены в

пробе, отобранной из водоема Верхнесадового, а самые низкие (0.001–0.012 мг/л) выявлены в ставке Мраморном. Для остальных водоемов характерна высокая дисперсность в распределении элемента – 0.0011–0.35 мг/л. Основные факторы, определяющие значительную вариативность концентрации Mn^{2+} , – количество осадков, состав дренируемых пород, присутствие органического вещества и микроорганизмов.

Концентрации Ag, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, V и U относительно низки и составляют тысячные доли миллиграмма на литр. Содержание серебра в водоемах, как правило, примерно одинаковое и равно 0.0025 мг/л, исключение составляют только воды ставка Мраморного и Мендера (А), в которых обнаружены аномально высокие концентрации Ag – до 0.28 и 0.084 мг/л соответственно.

Разброс концентраций кобальта велик и составляет 0.11–1.1 мкг/л, при этом содержания элемента во всех ставках, за исключением ставка Глубокий Яр и Кугульник, ниже, чем в водах зоны гипергенеза (рис. 5). Минимальные содержания кобальта выявлены в ставке Воронежском, расположенном на склоне г. Патиль, а максимальные – в ставке Колхозном. Во всех водах уровень содержания элемента ниже, чем его ПДК для рыбохозяйственных водоемов (0.01 мг/л) [16].

По содержанию хрома исследованные открытые водоемы можно разделить на три группы: с концентрациями до 1.0, 1.0–2.0, и >2.0 мкг/л. Наибольшая концентрация хрома (5.1 мкг/л) выявлена в водах ставка Верхнесадового, и источник элемента, вероятнее всего, – почвы. В целом, исключая воды ставка Верхнесадового, содержание хрома в воде ниже, чем кларк элемента в водах зоны гипергенеза [21]. Во всех исследованных водах содержание элемента ниже, чем его ПДК для рыбохозяйственных водоемов (0.001 мг/л).

Содержание урана низкое – от 0.05 до 3.3 мкг/л при среднем значении 0.95 мкг/л. Максимальная концентрация элемента диагностирована в ставке Мраморном. В целом, уровень урана в исследованных водах ниже (за исключением ставка Мраморного), чем его кларк в водах зоны гипергенеза [21].

Распределение меди в водах открытых водоемов достаточно ровное, концентрации ≤ 10 мкг/л, исключение составляет только ставок Верхнесадовый, содержание элемента в котором почти в шесть раз выше (57 мкг/л). Значительное содержание меди в водах ставка Верхнесадового, более чем в 50 раз превышающее ПДК элемента для вод рыбохозяйственных водоемов [16], обусловлено значительной антропогенной нагрузкой в этом районе.

Содержание свинца в исследованных водах в целом низкое – 0.4–11 мкг/л, соответствует клар-

Таблица 3. Геохимические ассоциации химических элементов в водоемах бассейна р. Бодрак

	Место отбора пробы	Геохимические ассоциации микрокомпонентов
1	Воронежский	Sn _{6,3} –Ba _{6,2} –Ag _{5,8} –Se ₄ –B _{1,5}
2	Ексиментий	Ba _{9,9} –Sn _{6,3} –Ag _{4,4} –Se _{3,3} –B _{2,3} –Sr _{1,8}
3	Колхозный	Ba _{10,4} –Sn ₅ –Ag _{4,8} –B _{3,5} –Se _{3,3} –Sr _{2,4} –V _{1,9} –Pb _{1,8} –As _{1,5} –Al _{1,5}
4	Ленинградский	Ag _{15,6} –Ba _{14,1} –Sn _{5,3} –Sr _{4,6} –Se _{3,3}
5	Мангушский	Ba _{8,6} –Sn _{6,4} –Ag _{5,8} –Se ₄ –Sr _{3,5} –B _{3,2} –Zn _{2,1}
6	Мендер (дальний)	Ba _{17,9} –Ag _{10,8} –Sn _{6,7} –Sr _{4,3} –Zn _{4,1} –Se ₄ –Ni _{3,5} –B _{1,6} –Al _{1,5}
7	Мендер (А)	Ag ₁₄₅ –Ba _{24,2} –Sn _{6,7} –Sr _{4,8} –Se _{3,3} –B _{1,5}
8	Мендер (В)	Ba _{16,3} –Sr ₅ –Sn _{3,7}
9	Мраморный	Ag ₃₇₀ –Ba _{21,2} –Sr _{9,9} –Se _{7,9} –Mo _{7,7} –Sn _{4,9} –Zn _{2,6} –Pb _{1,9} –B _{1,6}
10	Скалистое (у дороги)	Ba _{14,3} –Zn _{10,9} –Ag _{8,6} –Sn _{6,1} –Se _{5,5} –B _{4,5} –Sr _{3,9} –V _{2,5} –Pb _{2,1} –Mo ₂ –Ni _{1,8} –Sb _{1,6}
12	Широкий Яр	B _{15,5} –Sn _{6,5} –Ag _{4,7} –Se _{3,3} –Sr _{1,9}
14	Кагульчик	Ba _{16,3} –B _{2,0} –Ag _{1,7}
15	Юркин	Ba ₄₃ –B _{13,3} –Ag _{8,6} –Sn _{6,1} –Se _{5,5} –Sr _{4,9} –Al _{2,5} –Mn _{2,1} –Sb _{1,6}
18	Верхнесадовый	Pb _{63,3} –Zn _{27,1} –Ba _{21,4} –Cu _{10,2} –Ag _{8,6} –Mn _{7,1} –Sn _{6,1} –Se _{5,5} –Ni _{3,9} –Sr _{3,5} –Fe ₂ –Al _{1,9} – B _{1,8} –Cr _{1,8} –Sb _{1,6} –V _{1,5}
19	Глубокий Яр	Ba _{13,8} –Ag _{8,6} –Sn _{6,1} –Se _{5,5} –Sr _{3,4} –B ₂ –Pb _{1,9} –Mo _{1,6} –Sb _{1,6}

ку элемента в водах гипергенеза (рис. 5). Содержание Pb во всех исследованных водах, за исключением поверхностных вод ставка Верхнесадового (140 мкг/л), не превышает ПДК элемента для вод рыбохозяйственных водоемов [16].

С целью выявления природных и техногенных гидрохимических аномалий в водоемах бассейна р. Бодрак выделены геохимические ассоциации химических элементов (табл. 3). Для оценки интенсивности аномалии использован коэффициент концентрации: $K_c = C_i/C_\phi$, где C_i – средняя концентрация i -го химического элемента в выборке, C_ϕ – фоновая концентрация этого элемента. В качестве фоновых содержаний использованы средние концентрации химических элементов в водах зоны гипергенеза [11, 21]. При сравнении этих данных с естественной геохимической ассоциацией подземных вод изучаемой территории [8, 11]: Ba (2.0–58.2) – B (1.1–10.3) – Ag (3.2–8.6) – Sr (1.6–8.4) – Sn (3.4–4.9) – выявлено, что антропогенному влиянию подвержены ставки с номерами 3, 6, 9, 10, 15, 18, 19. Самым загрязненным из них оказался ставок на ул. Верхнесадовой в пос. Прохладном. Такой вывод сделан на основе анализа коэффициентов концентрации элементов ассоциации.

Стоит отметить, что в водах Мраморного ставка определены повышенные относительно природного фона концентрации молибдена, цинка и свинца. Это объясняется большим количеством отдыхающих в летний период, приезжающих непосредственно к водоему на частных машинах.

При этом проба воды на анализ была отобрана у самого берега.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ

Для интерпретации данных изотопного состава использована линия Крейга – глобальная линия метеорных вод [20]: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$. Изотопные данные выражают в относительных единицах: $\delta R(\%) = (R_{\text{пр}}/R_{\text{ст}} - 1) \times 1000$, R – атомные отношения изотопов водорода ($^2\text{H}/^1\text{H}$) или кислорода ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) в пробе ($R_{\text{пр}}$) и стандарте ($R_{\text{ст}}$); δ – отношение стабильных изотопов относительно стандарта, ‰. Величина δ показывает, насколько проба обеднена ($\delta < 0$) или обогащена ($\delta > 0$) тяжелым изотопом в сравнении со стандартом ($\delta = 0$).

В табл. 4 показаны концентрации стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, ‰) в водах открытых водоемов бассейна р. Бодрак. Из таблицы видим, что изотопный состав одного и того же водоема может варьировать, что объясняется колебаниями температуры воздуха (при высокой температуре происходит испарение) и количества атмосферных осадков (которые имеют более легкий изотопный состав по сравнению с подземными водами). На рис. 6 результаты измерений представлены относительно глобальной линии метеорных вод. Два десятка образцов воды из ставок были отобраны в летний период в 2012, 2013, 2014 и 2018 гг.

Таблица 4. Стабильные изотопы в водах открытых водоемов бассейна р. Бодрак

Дата отбора	Место отбора пробы	Номер на схеме	$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$	$\delta^2\text{H}, \text{‰}$
2012 г., июль	Мангушский	5	-4.1	-42
	Воронежский	1	-2.8	-36
	Кагульчик	14	-4.5	-42
	Музачи (Музаран)	16	-3.4	-37
	Широкий Яр	12	-8.2	-60
	Мраморный	9	0	-17
2013 г., июль	Колхозный	3	-9.5	-62.4
	Мангушский	5	1.4	-12.3
	Воронежский	1	1.4	-11.5
2014 г., июнь	Воронежский	1	-6.1	-43
2014 г., июль	Воронежский	1	-5.7	-43
	Ексиментий	2	-5.8	-47
	Колхозный	3	-2	-25
	Мангушский	5	-6.4	-44
	Мраморный	9	-1.9	-23
	Аммонитовый	20	-4.8	-36
	Корабелка	13	-3.3	-27
	Мраморный	9	-0.4	-14
2018 г., июль	Воронежский	1	-3.9	-37

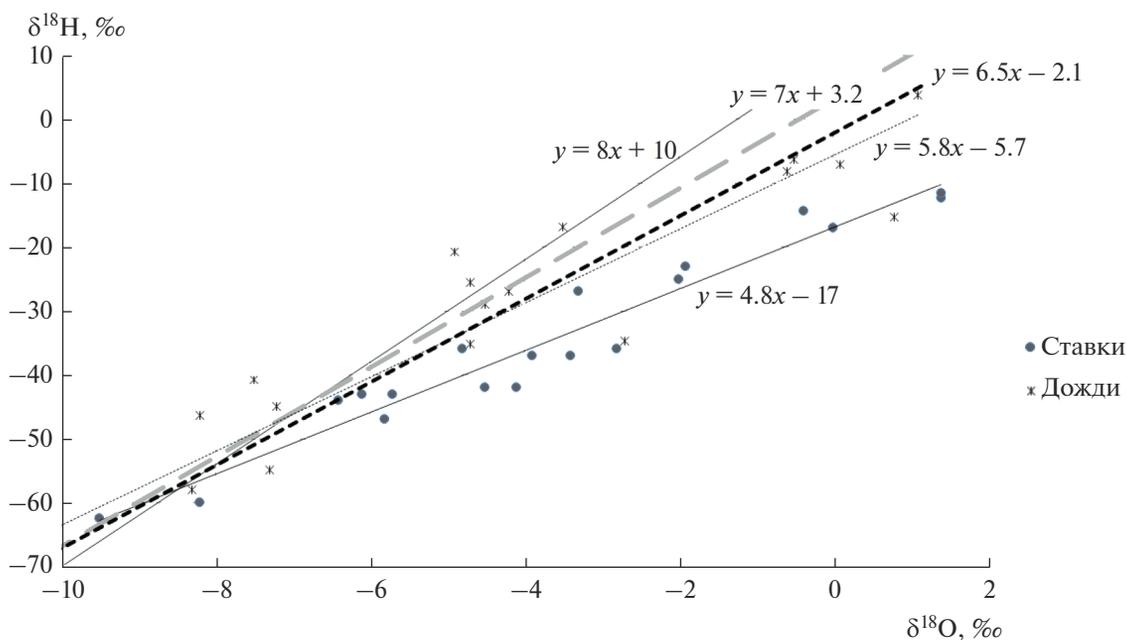


Рис. 6. Фигуративные точки открытых водоемов (ставков) на диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$.

Ранее в [9] был детально изучен изотопный состав атмосферных осадков, собранных на территории крымской базы СПбГУ в с. Трудолюбовка в летний период. В результате этих исследований на основании корреляционных соотношений сезонных содержаний $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в атмосферных осадках и внутригодовых изменений температуры приземного воздуха получена расчетная линия метеорных вод: $\delta^2\text{H} = 6.5 \delta^{18}\text{O} - 2.1$, которая также показана на диаграмме (рис. 6). Для расчета использовались средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ осадков по данным метеостанции в пос. Почтовом с учетом высотного градиента. На диаграмме также приведена локальная линия метеорных вод для северного склона Крымских гор, рассчитанная на основе фактических данных [5].

Изотопный состав природных вод может меняться за счет фракционирования (разделения) изотопов водорода и кислорода под воздействием ряда факторов; основные из них на изучаемой территории – процессы испарения, которые имеют определенные закономерности [19]. Вероятно, в отдельных случаях возможен изотопный обмен с водовмещающими породами, но эти процессы не повсеместны, так как район расположен в области активного водообмена.

В результате фракционирования фигуративные точки природных вод могут смещаться относительно линии метеорных вод, и их расположение в рамках диаграммы $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ позволяет сделать некоторые диагностические выводы (например, выявить основной сезон наполнения водоемов).

Изменения изотопного состава природных вод при испарении фиксируются снижением углового коэффициента (тангенса угла наклона) линий регрессии до 4–6 [19, 20]. Ставки заполняются сезонно дождевыми и паводковыми водами р. Бодрак, значительную роль при этом играют притоки подземных вод. Обычно к концу лета за счет процессов испарения вода в ставках обогащается тяжелыми изотопами по сравнению с водами исходного состава. Угловой коэффициент для ставок опробования 2012 и 2014 гг. составил 5.1. Если судить по испарительной линии ставок ($y = 4.8, x = 17$), в начальной стадии их наполнения вода имела следующие изотопные характеристики: $\delta^{18}\text{O} = -8.8\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -59\text{‰}$ (по точке пересечения с расчетной линией метеорных вод), что соответствует весенним месяцам (март–апрель). В работе, посвященной оценке испарения по изотопным данным [19], предполагается, что за счет испарения пруды теряют до 70–90% годового объема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На фоне глобального изменения климата в крымском Предгорье в последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция повышения температуры приземного воздуха на 1.5–2.0% в год.

Изотопный состав воды указывает на то, что наполнение водоемов осуществляется, главным образом, в зимне-весенний период за счет атмосферных осадков, а летом значительная часть этих вод испаряется. Количество атмосферных осадков, выпавших за гидрологический год, и температура в летний период обуславливают минерализацию поверхностных вод.

Для ставок изучаемой территории подтвердилась естественная геохимическая ассоциация химических элементов (Ba–B–Ag–Sr–Sn), выявленная ранее для подземных вод бассейна р. Бодрак [8, 11]. Наиболее загрязненными оказались водоемы, на водосборной площади которых осуществляется антропогенная деятельность (у трассы в пос. Скалистом, ставки Верхнесадовый и Юркин, расположенные в пос. Прохладном, ставка Мендер – в верховьях Московского оврага). Ставки в верховьях бассейна р. Бодрак балочного типа – наиболее чистые (относительно фоновых значений).

Химический состав исследованных водоемов зависит от ряда факторов – метеоусловий года (температуры приземного воздуха, количества зимне-весенних атмосферных осадков), паводковых вод, геолого-гидрогеологических условий территории, обуславливающих притоки подземных вод, и антропогенных факторов.

При решении специальных водохозяйственных задач необходимо учитывать особенности формирования химического состава пресных вод, употребляемых в хозяйственно-питьевых целях, что придает исследованиям такого рода практическую ценность.

Для оценки качества поверхностных вод Горного Крыма по гидрохимическим показателям в качестве фоновых значений предлагаем использовать химический состав водоемов, расположенных в верхнем течении р. Бодрак.

Авторы благодарят Г.М. Ельцову и Э.М. Правосолова (ЛИГФ СПбГУ) и И.В. Токарева за измерение изотопного состава воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас. Автономная республика Крым / Под ред. Н.В. Багрова. Л.Г. Руденко. Киев; Симферополь: Ин-т географии НАН Украины, 2003. 80 с.
2. Багрова Л.А., Боков В.А., Багров Н.В. География Крыма. Киев: Лыбидь, 2001. 302 с.
3. Барабошкина Т.А., Березкин В.Ю. Эколого-геологическое картографирование бассейна р. Бодрак

- (Крымско-Кавказская горная зона) // LAP Lambert Academic Publishing. 2011. 152 с.
4. Геологическая история Бахчисарайского района Крыма (учебное пособие по Крымской практике) / Под ред. *А.М. Никишина*. М.: Изд-во Московского ун-та, 2006. 60 с.
 5. *Дублянский Ю.В., Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Токарев С.В., Шпётль К.* Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // *Спелеология и карстология*. № 9. Симферополь, 2012. С. 14–21.
 6. *Жук В.О., Ергина Е.И.* Анализ современной метеорологической ситуации в предгорном Крыму // *Уч. зап. Крымского федерального ун-та. География. Геология*. 2018. Т. 4 (70). № 2. С. 227–241.
 7. *Каюкова Е.П.* Гидрохимические особенности атмосферных осадков полигона Крымской геологической практики СПбГУ // *Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология. География*. 2011. Вып. 2. С. 26–43.
 8. *Каюкова Е.П.* Оценка подземного стока как элемента водного баланса при комплексных гидрогеологических исследованиях (северо-западные склоны Крымских гор). Дис. ... канд. геол.-минералог. наук. СПб.: Санкт-Петербургский горный ун-т, 2018. 186 с.
 9. *Каюкова Е.П.* Формирование изотопного состава природных вод Горного Крыма под влиянием естественных процессов // *Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология. география*. 2016. Вып. 2. С. 11–26.
 10. *Каюкова Е.П., Чарыкова М.В.* Особенности химического состава подземных и поверхностных вод полигона Крымской учебной практики геологического факультета СПбГУ // *Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география*. 2010. Вып. 3. С. 29–47.
 11. *Каюкова Е.П., Барабошкина Т.А. Филимонова Е.А.* Гидрогеохимические особенности подземных вод бассейна реки Бодрак (Качинское поднятие Горного Крыма) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*. 2020. № 4. С. 55–63.
 12. *Каюкова Е.П., Филимонова Е.А.* Качество пресных подземных вод Горного Крыма (долина реки Бодрак) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология*. 2022. Номер 1. С. 79–88.
 13. Маршруты Крымской учебной практики по Общей геологии: учебное пособие / Под ред. *Р.В. Веселовского, М.А. Романовского, Н.И. Косевич, А. Гущина*. М.: КДУ, Добросвет, 2021. 215
 14. *Никитин М.Ю., Болотов С.Н.* Геологическое строение Крымского учебного полигона МГУ. Ч. 2. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2007. 110 с.
 15. Погода и Климат. Справочно-информационный портал. <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 4.12.2021)
 16. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения” (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203).
 17. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”.
 18. *Семенова В.М.* Гидрогеологические условия междуречья Бодрак и Кача // *Очерки геологии Крыма*. Тр. Крымского геол. науч.-уч. центра. М.: Геол. фак. МГУ, 1997. Вып. 1. С. 120–130.
 19. *Токарев И.В., Амеличев Г.Н.* Оценка испарения по данным об изотопном составе воды (2H, 18O) // *Уч. зап. КФУ. География. Геология*. 2020. Т. 6 (72). № 2. С. 294–319.
 20. *Ферронский В.И., Поляков В.А.* Изотопы гидросферы земли. М.: Науч. мир, 2009. 632 с.
 21. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
 22. *Шумигина А.Ю., Цыпин М.А. и др.* Эколого-гидрохимический мониторинг природных вод Крымского учебного полигона // *Школа экологической геологии и рационального недропользования*. Материалы конф. СПб., 2006. С. 300–301.
 23. *Юдин В.В.* Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАИПИ, 2011. 336 с.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 551.582

**СЦЕНАРНЫЕ ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО
И ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА КРЫМА В XXI ВЕКЕ
ПО ДАННЫМ МОДЕЛЕЙ КЛИМАТА CMIP6¹**© 2022 г. В. А. Семенов^{a, b, *}, М. А. Алешина^{a, b}^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017 Россия^bИнститут географии РАН, Москва, 119017 Россия

*e-mail: vasetmenov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 23.12.2021 г.

После доработки 15.02.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2022 г.

Представлены сценарные проекции изменений климата в XXI в. в Крыму по данным ансамбля моделей климата последнего поколения CMIP6 для агрессивного SSP585 и умеренного SSP245 сценариев антропогенного воздействия. Показаны изменения среднесезонных для зимы и лета значений температуры и осадков, количества дней с экстремальными аномалиями температуры и осадков, интенсивности осадков и вклада сильных осадков в сезонную сумму. Для современного периода данные моделей сравниваются с данными реанализа ERA5 и интерполированными сеточными данными наблюдений CRUTS4.05. К концу XXI в. в среднем по ансамблю моделей ожидается повышение летней температуры на ~6 и на 2.5°C для сценариев SSP585 и SSP245 соответственно. Для зимы рост температуры значительно меньше и составляет 3.5 и 1.5°C. Летом число дней с экстремально высокой температурой (95% перцентиль функции распределения для 1981–2010 гг.) уже в середине XXI в. вырастет в 5–6 раз, а к концу века даже для умеренного сценария составит ~40 дней. Для сезонных осадков характерна сильная межгодовая изменчивость, на фоне которой зимой в моделях отмечается статистически незначимый рост, а летом к концу XXI в. ожидается существенное уменьшение осадков на ~15 и 40% для сценариев SSP585 и SSP245 соответственно. При этом летом не прогнозируется статистически значимого снижения интенсивности и экстремальности осадков. Зимой на фоне некоторого роста сезонной суммы осадков существенно растет доля экстремальных осадков в общей сумме осадков — от ~25 до 35%. Важно отметить, что в ближайшие два десятилетия прогнозируемые изменения практически не зависят от анализируемых сценариев антропогенного воздействия. Уменьшение осадков при росте температуры указывает на важную роль динамики атмосферы в будущих изменениях характеристик осадков в исследуемом регионе.

Ключевые слова: климат Крыма, изменения климата, сценарии изменения климата, модели CMIP6, экстремальные погодные события.

DOI: 10.31857/S0321059622040174

ВВЕДЕНИЕ

Рост приземной температуры на территории России в последние десятилетия происходит более чем в два раза быстрее, чем в среднем по планете [5]. Такие изменения объясняются арктическим усилением глобального потепления [30] и воспроизводятся моделями климата. В целом, современные тенденции изменения климата в России характеризуются более быстрыми темпами

потепления зимой в высоких широтах на Европейской территории, а в переходные сезоны — в Азиатской части страны, а также увеличением среднегодового количества осадков в северных и уменьшением в южных регионах [3, 5]. При этом отмечается рост опасных погодных явлений, связанных с крупномасштабными и региональными изменениями температурно-влажностного режима и атмосферной циркуляции [10].

Изменения климата в регионе Черного моря, в том числе в Крыму, характеризуются важными особенностями ввиду близости моря — крупномасштабного источника влаги и температурных контрастов, наличием прибрежных горных массивов, интенсивной циклонической активностью. На формирование региональных измене-

¹ Статистическая обработка модельных данных выполнена в рамках Госзадания Института географии РАН (AAAA-A19-119022190173-2, FMGE-2019-0009). Исследование будущих изменений экстремальных осадков выполнено при поддержке РФ (проект 19-17-00242). Валидация результатов моделей для современного периода выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-55-14003).

ний климата и его аномалий оказывают влияние глобальное потепление, естественные климатические колебания в Северной Атлантике, явление Эль Ниньо/Южное Колебание, а также рост температуры поверхности Черного моря [11–13, 24, 29].

Температурный режим в черноморском регионе в последние десятилетия в целом менялся в сторону роста средней температуры, частоты и интенсивности ее экстремально высоких значений [8]. В то же время тенденции изменения осадков были в целом слабо отрицательные и статистически не значимые [2]. В понимании механизмов формирования экстремальных осадков в черноморском регионе, связи экстремальных осадков с аномалиями циркуляции атмосферы и глобальным потеплением существуют значительные пробелы. Данные наблюдений указывают на отсутствие статистически значимого роста интенсивности осадков в современный период [2, 18, 33]. Эксперименты с моделью климата показали, что в то время как фактор роста температуры поверхности Черного моря приводит к увеличению экстремальности осадков на побережье, фактор глобального потепления в виде увеличения температуры глобального океана в последние десятилетия снижает интенсивность экстремальных осадков в регионе из-за подавления конвекции и усиления дивергенции влаги [1]. Тенденция к снижению экстремальности летних осадков с ростом температуры в целом характерна для южных регионов России [14].

В то же время в начале XXI в. на черноморском побережье произошел ряд сильных событий с экстремальными осадками, в том числе беспрецедентных за историю наблюдений и связанных с региональными изменениями климата [27]. Современные тенденции изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы, рост влагоемкости с потеплением также могут способствовать росту экстремальных осадков [9, 31].

Ввиду значительной плотности населения и инфраструктуры в черноморском регионе экстремальные погодные явления, как правило, сопровождаются значительными негативными последствиями, а изменения климата оказывают существенное влияние на ведение сельского хозяйства и функционирование туристической отрасли. Малая плотность и водность речной сети Крыма с преимущественно паводочным режимом стока, перекрытие поступления вод Днепра в Северо-Крымский канал в 2014 г., современные тенденции к усилению засушливости климата Крыма делают проблему водной обеспеченности Крыма одной из наиболее важных для устойчивого развития региона.

Для решения этой проблемы, выработки научно-обоснованных решений в области обеспечения водной и водно-экологической безопасности

критически важны оценки будущих изменений климата в ближайшие десятилетия. Такие оценки можно получить с использованием ансамбля глобальных моделей климата с заданными проекциями антропогенного воздействия в течение XXI в. (эмиссия парниковых газов и аэрозолей). В последние годы стали доступны данные ансамблей моделей климата последнего поколения CMIP6, на основе которого делаются оценки изменений Межправительственной группой экспертов будущих изменений климата [25]. Полученные ранее оценки возможных изменений климата в черноморском регионе показали значительный рост среднегодовой температуры и отсутствие значимых изменений осадков [7, 15].

В настоящей работе максимальное количество данных моделей CMIP6 (ограниченного пространственным разрешением) было использовано для расчета возможных изменений режима температуры и осадков в Крыму на протяжении XXI в. для двух возможных сценариев антропогенного воздействия на климат: агрессивного и умеренного. Это позволяет оценить неопределенность климатического прогноза, связанную с модельными особенностями, выбором сценария воздействия и внутренней изменчивостью [20]. Для последних четырех десятилетий и XX в. в целом данные моделей сравниваются с эмпирическими данными.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В работе анализируются данные девятнадцати моделей общей циркуляции атмосферы и океана, которые входят в международный проект сравнения моделей климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) [19]. В проекте участвует более 60 моделей (среди которых содержатся в том числе разные версии одних и тех же модельных систем), предоставляющие для анализа различные по полноте наборы данных. Не все модели имеют достаточно детализированное пространственное разрешение, при котором Крым с характерной протяженностью $\sim 2.5^\circ$ по долготе и 1.5° по широте представлен на модельной сетке как отдельный полуостров. Поэтому в качестве критерия выбора моделей для анализа выступали горизонтальное разрешение моделей (шаг сетки $\leq 2.5^\circ$ по широте и 1.5° по долготе), а также наличие в открытых базах данных моделей в суточном разрешении для температуры и сумм осадков. Шаг сетки в выбранных моделях варьирует от 0.5° – 1° (модели CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3, MPI-ESM1-2-HR) до 2° – 2.5° (INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR). Использовались данные численных экспериментов с двумя сценариями антропогенного воздействия – SSP585 и SSP245 [32]. Сценарий SSP585 описывает будущее развитие общества и экономики без сдерживания роста

Таблица 1. Модели CMIP6, использовавшиеся для анализа, их горизонтальное разрешение и критерии экстремальных значений температуры и осадков для Крыма

Модели	Горизонтальное разрешение		95%-й процентиль осадков, мм/день		5%-й процентиль температуры, °С		95%-й процентиль температуры, °С	
	шаг по долготе, °	шаг по широте, °	зима	лето	зима	лето	зима	лето
ACCESS-CM2	1.875	1.25	8.46	10.71	-12.39	16.47	6.69	28.51
ACCESS-ESM1-5	1.875	1.25	8.42	12.60	-9.65	19.92	7.81	31.56
BCC-CSM2-MR	1.125	1.121	8.37	7.53	-7.00	16.36	9.66	29.33
CAMS-CSM1-0	1.125	1.121	8.62	7.72	-10.17	15.95	7.88	25.97
CESM2-WACCM	1.25	0.942	8.70	5.89	-3.63	18.89	12.03	29.34
CMCC-CM2-SR5	1.25	0.942	8.92	7.62	-1.97	20.19	10.87	31.20
CNRM-CM6-1-HR	0.500	0.499	10.11	15.00	-9.75	16.93	9.53	27.46
EC-Earth3	0.703	0.702	7.67	7.71	-6.22	17.58	9.04	28.53
GFDL-ESM4	1.25	1	8.55	11.28	-6.95	17.91	9.16	28.38
HadGEM3-GC31-LL	1.875	1.25	9.42	9.50	-2.47	17.01	10.64	26.07
INM-CM5-0	2	1.5	10.30	3.60	-1.34	17.75	11.32	28.81
IPSL-CM6A-LR	2.5	1.268	11.55	15.48	-2.84	17.96	11.20	28.48
KACE-1-0-G	1.875	1.25	9.82	6.37	-5.28	18.24	10.47	27.55
MIROC6	1.406	1.401	9.47	6.48	-3.09	21.78	11.82	33.53
MPI-ESM1-2-HR	0.938	0.935	11.33	11.21	-7.81	18.09	10.16	30.89
MRI-ESM2-0	1.125	1.121	9.94	10.31	-4.94	17.55	10.56	25.92
NorESM2-MM	1.25	0.942	8.28	6.92	-3.74	18.34	11.01	29.32
TaiESM1	1.25	0.942	9.82	7.22	-3.80	20.93	10.76	31.43
UKESM1-0-LL	1.875	1.25	8.12	6.99	-3.93	16.82	10.39	26.18
ERA5	0.25	0.25	7.91	11.77	-5.72	17.34	8.82	27.11

эмиссий парниковых газов с почти удвоением эмиссий CO₂ к середине XXI в. и монотонным ростом антропогенного радиационного воздействия с современных значений 2.5 Вт/м² до 8.5 Вт/м² к концу века. Сценарий SSP245 подразумевает удерживание эмиссии примерно на современном уровне до середины века и последующее их снижение, в результате чего внешнее радиационное воздействие достигает максимума в 4.5 Вт/м² к 2080-м гг.

В каждой модели выбирались узлы сетки, которые попадают на территорию Крымского п-ова, для которых проводился осредненный для региона расчет основных температурных характеристик и показателей режима осадков. Помимо среднесезонных величин характеристик температурного режима, для каждой модели были получены повторяемости (числа дней в сезон) экстремально низких и экстремально высоких значений температуры. В качестве пороговых значений экстремально низкой температуры использовался 5%-й процентиль, а для экстремально высоких — 95%-й процентиль функции распределения вероятностей для периода 1981–2010 гг. Экстремаль-

ными осадками считались суточные суммы осадков, превышающие 95%-й процентиль функции распределения для периода 1981–2010 гг. Анализировались изменения повторяемости экстремальных значений температуры и осадков для каждого сезона в отдельности для периода 1900–2100 гг. Также анализировалась интенсивность осадков — средние за сезон суммы осадков за дни с осадками, превышающими 0.1 мм/день, и вклад экстремальных осадков в общую сумму осадков. В работе представлены результаты расчетов для зимы и лета. Список использованных моделей, их пространственное разрешение, значения для 5%-х и 95%-х процентилей функций распределения температуры и осадков для современного климата, использованные как критерии экстремальных пороговых значений, приведены в табл. 1.

В качестве эмпирических данных для сравнения с модельными результатами использовались суточные данные реанализа ERA5 с горизонтальным разрешением 0.25° × 0.25° за период 1979–2021 гг. [23]. Для оценки более продолжительных наблюдавшихся изменений в среднем режиме температуры и осадков использовались средне-

месячные данные CRU TS4.05 за период 1901–2021 гг., полученные с помощью интерполяции данных стационарных наблюдений на широтно-долготную сетку $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ [22].

В качестве количественной характеристики климатических изменений используется коэффициент линейного тренда для 40-летних периодов 1981–2020, 2021–2060 и 2061–2100 гг. Проводились оценки статистической значимости трендов с использованием F-критерия Фишера с уровнем значимости 0.05. Для оценки модельных изменений климата, помимо анализа данных индивидуальных моделей, использовались осредненные по ансамблю из 19-ти выбранных моделей анализируемые характеристики. Средние по ансамблю моделей значения считаются более надежной оценкой современных и будущих изменений климата, связанных с внешним воздействием, поскольку такое осреднение может уменьшить случайно-распределенные ошибки индивидуальных моделей (например, [21, 28]). Следует отметить, что такой подход, будучи самым распространенным, не всегда оптимальный и более сложные статистические модели предлагаются для анализа мульти-модельных результатов [6, 17].

Поскольку цель работы — оценка изменений климата, для иллюстрации результатов использовались аномалии модельных и эмпирических данных относительно периода 1981–2010 гг., что позволяет исключить систематические ошибки моделей.

Источник наиболее достоверных данных по температуре и осадкам — это наблюдения на метеорологических станциях. Для относительно небольшого по размеру полуострова со сложной орографией даже хорошо развитая метеорологическая сеть не всегда может обеспечить репрезентативную информацию по изменениям климата для отдельных регионов и полуострова в целом, тем более что это сложно сделать на основе трех доступных продолжительных рядов наблюдений на станциях Симферополь, Феодосия и Керчь. Использование сеточных данных реанализа, полученных в модели атмосферы, ассимилирующей различные эмпирические данные, в том числе влажность, температуру и скорость ветра, — это вынужденная замена эмпирических данных для сравнения с сеточными данными моделей, осредненными для всего полуострова. В целом данные реанализа показали хорошее соответствие данным наблюдений для температуры и удовлетворительное — для осадков. Проведен сравнительный анализ данных реанализа ERA5 и архива CRU с данными доступных метеорологических станций за период 1981–2020 гг. В табл. 2 представлены результаты сравнения средних характеристик осадков и температуры за исследуемый

период, а также значения коэффициентов линейных трендов по основным показателям.

Между стационарными данными и данными реанализа ERA5, а также архива CRU TS для температуры установлена высокая статистически значимая связь. Коэффициенты корреляции для всех станций оказались ≥ 0.95 . Средняя ошибка среднесезонной температуры для станций не выходит за границы $\pm 1.5^\circ\text{C}$. Значения трендов температуры в сеточных архивах также близки к наблюдаемому на станциях значениям. Для режима осадков коэффициенты корреляции ниже, чем для температуры, но также статистически значимы и составляют преимущественно 0.7–0.8. При этом средние ошибки оценок сезонных сумм осадков могут достигать 30%, что говорит о низком качестве данных по осадкам в сеточных архивах данных. Отметим, что во всех сеточных архивах есть ошибки, связанные с процедурой интерполяции, и невозможно получить идеальной согласованности сеточных и стационарных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Тренды анализируемых характеристик для зимы, лета и года в среднем для трех 40-летних периодов: современного (1981–2020 гг.), ближайших 40 лет (2021–2060 гг.) и второй половины XXI в. (2061–2100 гг.) — представлены в табл. 3. Для моделей климата показаны средние по ансамблю моделей значения, что представляет собой отклик на внешние воздействия (антропогенные и естественные). Для современного периода модели в среднем для ансамбля хорошо воспроизводят наблюдаемые изменения всех рассматриваемых температурных характеристик, показывая не только качественное, но и количественное (как правило, с расхождением $\leq 30\%$) соответствие результатов. Изменения практически всех характеристик, за исключением числа дней с экстремально низкой температурой зимой, статистически значимы как в наблюдениях, так и в моделях и соответствуют ожидаемым при глобальном потеплении тенденциям — росту средней температуры при снижении/росте числа дней с экстремально низкими/высокими температурами как зимой, так и летом. Отметим, что модели, как и эмпирические данные, демонстрируют более сильные изменения всех трех температурных характеристик летом, чем зимой. В частности, как по эмпирическим данным, так и по данным модели климата количество дней с экстремально высокими значениями температуры летом в период 1981–2020 гг. выросло в ≥ 2 раза.

Динамика изменений среднесезонной температуры для зимы и лета в XX и XXI вв. по данным моделей в сопоставлении с эмпирическими данными показана на рис. 1. Изменения числа дней с температурными экстремумами приведены на

Таблица 2. Средние значения, коэффициенты корреляции и коэффициенты линейных трендов характеристик осадков и температуры по данным метеорологических станций и по данным реанализа ERA5 и CRU TS в ближайших к станциям узлах сетки

	Зима	Лето	Год	Зима	Лето	Год	Зима	Лето	Год
	33946 Симферополь			ERA5 Симферополь			CRU TS Симферополь		
Средняя T , °C	1.2	21.7	11.2	0.9	20.4	10.3	1.2	20.7	10.6
Средняя сумма осадков, мм/сезон	120	145.3	497.8	159.3	190	658.8	189.6	155.5	643.7
Коэффициент корреляции для средней T				0.97*	0.98*	0.96*	0.96*	0.98*	0.98*
Коэффициент корреляции для сумм осадков				0.89*	0.71*	0.87*	0.86*	0.7*	0.85*
Тренды средней T , °C/10 лет	0.5*	0.8*	0.62*	0.4*	0.8*	0.57*	0.45*	0.7*	0.56*
Тренды сумм осадков, %/10 лет	1.24	-7.29	-2.21	-3.18	-8.50	-4.63	2.60	-5.07	-0.62
Тренды интенсивности осадков, мм/д/10 лет	-0.14	-0.72*	-0.30	-0.04	-0.15	-0.05			
	33976 Феодосия			ERA5 Феодосия			CRU TS Феодосия		
Средняя T , °C	2.6	23.4	12.6	3.5	23.1	12.7	2.1	23.3	12.3
Средняя сумма осадков, мм/сезон	122.9	115.1	468.9	112.5	79	379.5	116.6	124.7	446.8
Коэффициент корреляции для средней T				0.98*	0.97*	0.98*	0.97*	0.98*	0.98*
Коэффициент корреляции для сумм осадков				0.87*	0.75*	0.80*	0.82*	0.76*	0.79*
Тренды средней T , °C/10 лет	0.48*	0.82*	0.63*	0.54*	0.75*	0.64*	0.44*	0.71*	0.57*
Тренды сумм осадков, %/10 лет	2.61	-2.50	-2.48	0.41	-10.7	-5.12*	1.96	-6.66	-1.44
Тренды интенсивности осадков, мм/д/10 лет	0.09	-0.05	0.03	0.04	-0.11	-0.04			
	33983 Керчь			ERA5 Керчь			CRU TS Керчь		
Средняя T , °C	1.4	22.8	11.7	2.2	23.5	12.3	1.7	22.7	11.8
Средняя сумма осадков, мм/сезон	106.8	124.7	425.8	124.3	113.2	454.8	124.6	129.1	473.3
Коэффициент корреляции для средней T				0.98*	0.97*	0.97*	0.96*	0.96*	0.98*
Коэффициент корреляции для сумм осадков				0.87*	0.62*	0.80*	0.85*	0.59*	0.73*
Тренды средней T , °C/10 лет	0.51*	0.82*	0.62*	0.4*	0.73*	0.55*	0.46*	0.7*	0.57*
Тренды сумм осадков, %/10 лет	0.02	-8.27	-3.99	0.21	-10.7*	-5.58*	1.79	-5.79	-0.55
Тренды интенсивности осадков, мм/д/10 лет	-0.10	-0.22	-0.06	0.07	-0.15	-0.04			

* Ячейки с корреляциями и трендами, статистически значимыми на уровне 5%.

рис. 2. Как отмечалось, модели (в среднем по ансамблю) достаточно хорошо воспроизводят изменения за последние 40 лет. В ближайшие ~20 лет изменения среднесезонных значений температуры и числа дней с экстремально высокой температурой практически не зависят от выбора сценария антропогенного воздействия и меняются приблизительно теми же темпами, как и в современный период. Затем начиная с 2040-х гг. при сценарии SSP245 рост этих характеристик заметно замедляется относительно сценария SSP585.

В результате к концу века при более агрессивном сценарии изменения будут примерно вдвое более сильными, чем при умеренном сценарии. Число дней с экстремально низкими значениями температуры при обоих сценариях в среднем для ансамбля уменьшается практически до нуля уже к 2040-м гг.

Изменения характеристик осадков по данным наблюдений в современный период не являются статистически значимыми (табл. 3), в том числе и

Таблица 3. Коэффициенты линейных трендов характеристик осадков и температуры по данным реанализа ERA5 и моделей CMIP6 (среднее по ансамблю 19 моделей)

Характеристики	Зима	Лето	Год	Зима	Лето	Год
1981–2020 гг.						
	Модели CMIP6			ERA5		
Средняя T , °C/10 лет	0.54*	0.68*	0.54*	0.37*	0.84*	0.60*
Число дней с экстремально высокой T , дней/10 лет	1.44*	3.45*	7.91*	0.98*	2.71*	7.60*
Число дней с экстремально низкой T , дней/10 лет	-0.98*	-1.38*	-3.84*	-0.24	-1.72*	-4.55*
Сумма осадков, %/10 лет	2.50*	-1.55	1.50*	-0.68	-9.93	-4.74
Интенсивность осадков, мм/день/10 лет	0.06*	0.00	0.04*	0.03	-0.14	-0.03
Число дней с экстремальными осадками, дней/10 лет	0.20*	0.01	0.33*	0.04	-0.27	-0.39
Вклад экстремальных осадков в общую сумму, %/10 лет	1.54*	0.13	0.74*	0.29	-2.00	0.29
2021–2060 гг.						
	Модели CMIP6 ssp245			Модели CMIP6 ssp585		
Средняя T , °C/10 лет	0.26*	0.43*	0.33*	0.56*	0.69*	0.59*
Число дней с экстремально высокой T , дней/10 лет	1.53*	4.15*	8.54*	3.17*	6.71*	14.41*
Число дней с экстремально низкой T , дней/10 лет	-0.24*	-0.34*	-1.31*	-0.42*	-0.35*	-1.70*
Сумма осадков, %/10 лет	0.92	-3.26*	-0.99	-0.52	-6.06*	-2.13*
Интенсивность осадков, мм/день/10 лет	0.02	-0.02	0.00	0.02	-0.01	0.01
Число дней с экстремальными осадками, дней/10 лет	0.06	-0.02	-0.11	0.05	-0.05	-0.07
Вклад экстремальных осадков в общую сумму, %/10 лет	0.37	0.16	-0.09	0.97*	0.07	0.42
2061–2100 гг.						
	Модели CMIP6 ssp245			Модели CMIP6 ssp585		
Средняя T , °C/10 лет	0.18*	0.28*	0.22*	0.69*	0.89*	0.74*
Число дней с экстремально высокой T , дней/10 лет	1.10*	2.27*	4.97*	4.97*	6.18*	17.4*
Число дней с экстремально низкой T , дней/10 лет	-0.06	-0.14*	-0.43*	-0.15*	-0.08*	-0.71*
Сумма осадков, %/10 лет	0.14	-1.05	0.07	0.19	-3.75*	-0.96*
Интенсивность осадков, мм/день/10 лет	0.00	0.00	0.02	0.03	-0.02	0.02*
Число дней с экстремальными осадками, дней/10 лет	0.02	-0.01	0.11	0.09	-0.06*	0.05
Вклад экстремальных осадков в общую сумму, %/10 лет	0.06	-0.08	0.37	1.25*	-0.74	0.34

* Ячейки с трендами, статистически значимыми на уровне 5%.

для суммы летних осадков, линейный тренд которой в последние четыре десятилетия составил почти 10%/десятилетие. Это обусловлено сильной межгодовой изменчивостью среднесезонных осадков с межгодовыми вариациями, часто составляющими ±50% от среднеклиматических значений (рис. 3). Модели климата в среднем для ансамбля, напротив, показывают статистически значимый рост всех анализируемых характеристик осадков зимой и в среднем для года, летом отмечается статистически незначимое снижение суммы осадков (табл. 2). Межгодовая изменчивость средних для ансамбля характеристик существенно ниже, чем по данным наблюдений, поскольку при внутриансамблевом осреднении отфильтровываются случайные межгодовые

флуктуации и остаются изменения, связанные с внешним воздействием на климат. Вместе с тем результаты индивидуальных моделей демонстрируют сравнимый с наблюдаемым диапазон межгодовой изменчивости осадков (рис. 3, 4). Следует также отметить, что модели в целом заметно (на 25%) переоценивают интенсивность осадков зимой и недооценивают летом.

Будущие изменения характеристик осадков в среднем для ансамбля анализируемых моделей также в основном не характеризуются сильными трендами и не являются статистически значимыми, за исключением сумм летних осадков, которые демонстрируют значимое снижение в период 2021–2060 гг. – на 3.3%/десятилетие и 6.1%/десятилетие для сценариев SSP245 и SSP585 соответ-

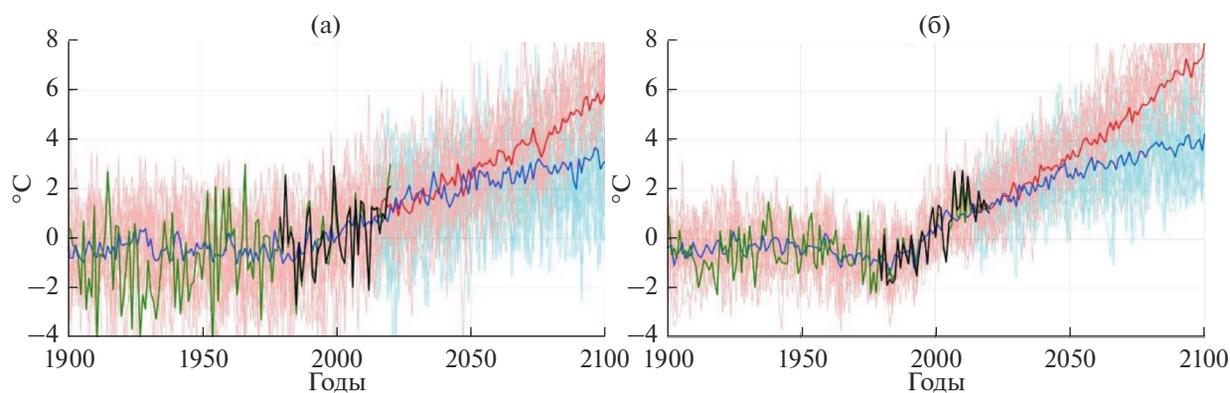


Рис. 1. Изменения аномалии среднесезонной приземной температуры ($^{\circ}\text{C}$) в Крыму (относительно средних значений для периода 1981–2010 гг.) зимой (а) и летом (б) по данным наблюдений CRUTS4.05 (зеленая кривая), реанализа ERA5 (черная кривая) и данным 19-ти моделей CMIP6. Синей и красной жирными кривыми показаны средние по ансамблям SSP245 и SSP585 моделей значения. Результаты индивидуальных моделей ансамбля показаны голубыми и розовыми тонкими кривыми для сценариев SSP245 и SSP585 соответственно. До 2014 г. оба сценария и результаты моделирования идентичны.

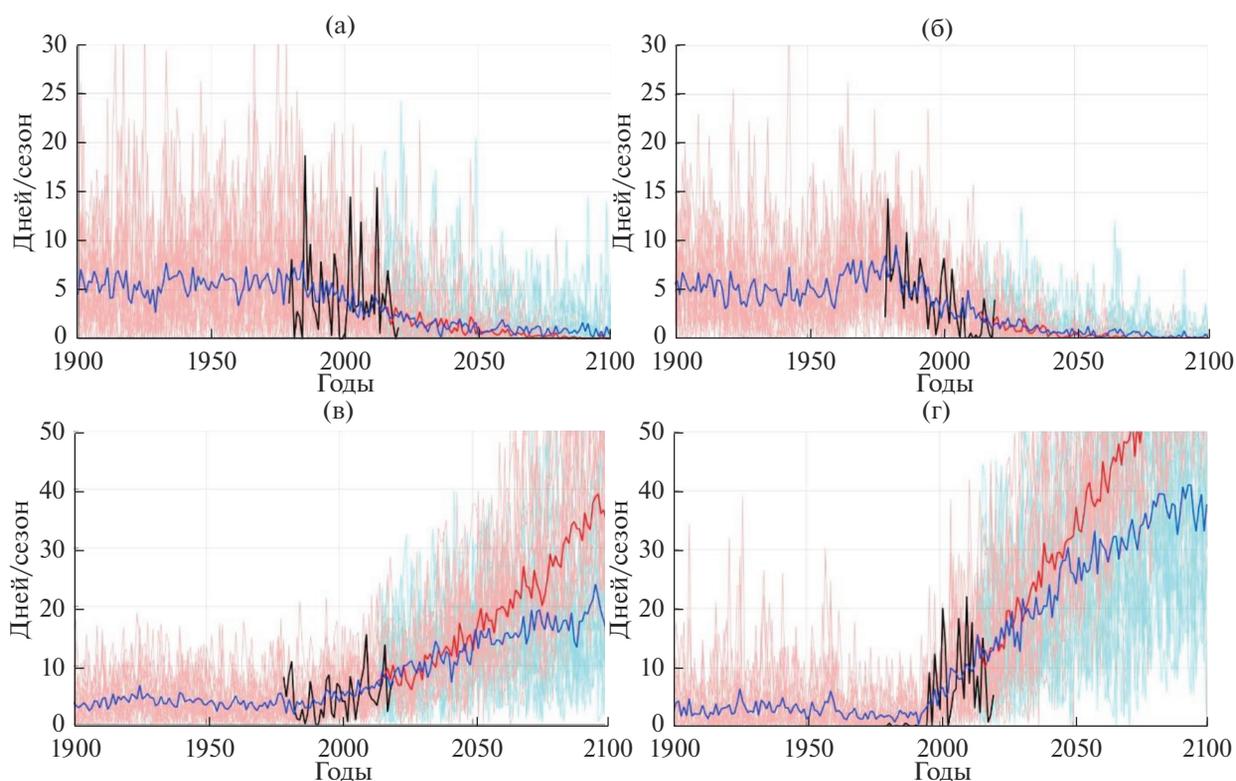


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для числа дней в сезон с экстремально низкими (а, б) и высокими (в, г) значениями температуры зимой (а, в) и летом (б, г).

ственно. Эти изменения хорошо заметны на рис. 3б. Следует отметить, что для периода 2061–2100 гг. с большим радиационным воздействием в обоих сценариях темпы снижения летних осадков уменьшаются в ~ 2 раза. Если для умеренного сценария SSP245 это можно объяснить соответствующим

снижением темпов роста приповерхностной температуры, то для сценария SSP585, где температура продолжает расти теми же темпами (рис. 1), такое снижение должно объясняться другими факторами, наиболее вероятно — связанными с изменениями атмосферной циркуляции.

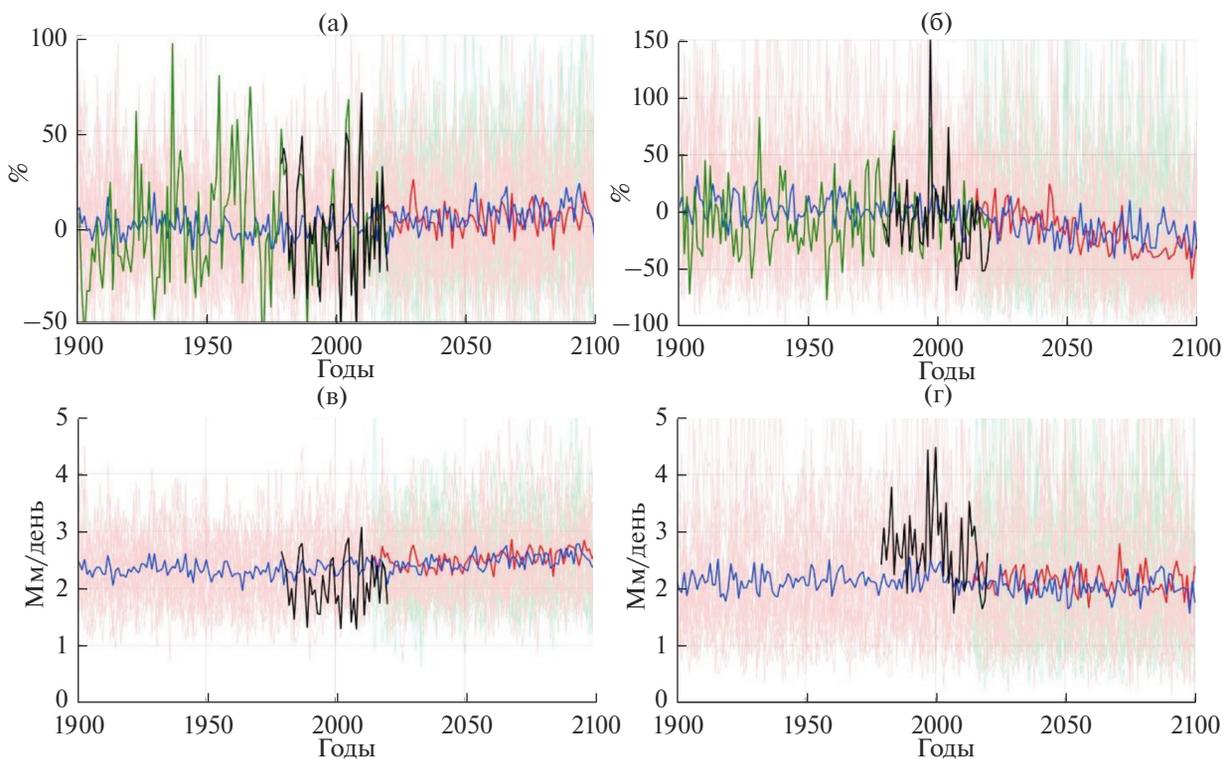


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для относительных (%) изменений среднесезонных сумм осадков (а, б) и интенсивности осадков (мм/день) (в, г) зимой (а, в) и летом (б, г).

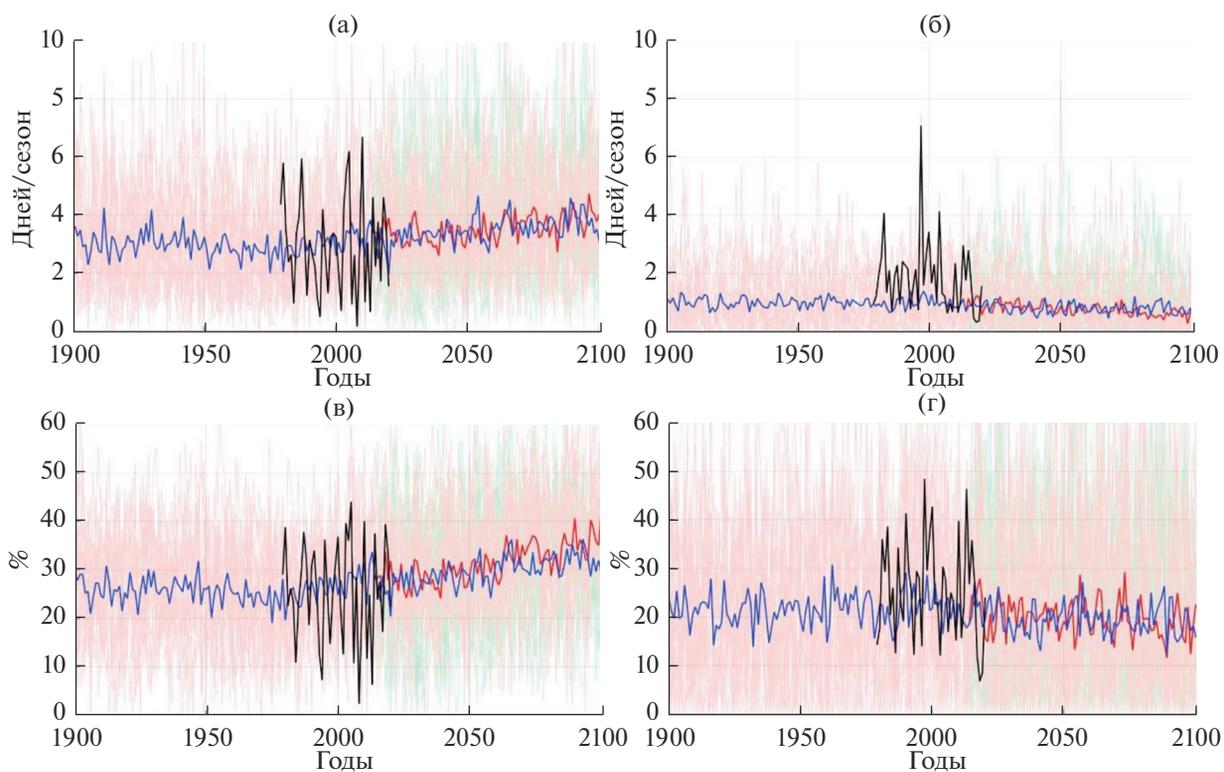


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но для числа дней в сезон с экстремальными осадками (а, б) и доли экстремальных осадков в общей сумме сезонных осадков (в, г) зимой (а, в) и летом (б, г).

В полученных результатах анализа изменений экстремальности осадков в моделях климата следует отметить статистически значимый рост вклада экстремальных осадков в общую сумму осадков зимой при агрессивном сценарии антропогенного воздействия SSP585 для обоих 40-летних периодов (2021–2060 гг. и 2061–2100 гг.), что хорошо заметно на рис. 4в.

В зимний период также ожидается рост числа дней с экстремальными осадками (рис. 4а), но он статистически незначим (табл. 3). Следует отметить, что, несмотря на заметное уменьшение сумм летних осадков в моделях, значимого снижения интенсивности осадков и их экстремальности не выявлено (рис. 4б, 4г; табл. 3). Только летом для сценария SSP585 в период 2061–2100 гг. отмечается небольшое, но статистически значимое снижение количества дней с экстремальными осадками (0.24 дня за весь период). Также отметим, что в период 1981–2020 гг. модели демонстрируют статистически значимый рост средних осадков, их интенсивности и экстремальности зимой, который для будущих периодов (за исключением вклада экстремальных осадков в общую сумму, как указано выше) сменяется слабым и незначимым увеличением. Эти результаты указывают на нелинейный отклик зимних осадков на рост температуры в моделях климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены сценарные проекции изменений климата в XXI в. в Крыму по данным ансамбля моделей климата последнего поколения CMIP6 для агрессивного SSP585 и умеренного SSP245 сценариев антропогенного воздействия. Анализировались изменения среднесезонных для зимы и лета температуры и осадков, количества дней с экстремальными аномалиями температуры и осадков, интенсивности осадков и вклада сильных осадков в общую сезонную сумму осадков. Для современного периода данные моделей сравниваются с данными реанализа ERA5 и интерполированными сеточными данными наблюдений CRUTS4.05.

К концу XXI в. в среднем по ансамблю моделей ожидается повышение летней температуры на $\sim 6^\circ\text{C}$ и на 2.5°C для сценариев SSP585 и SSP245 соответственно. Для зимы рост температуры значительно меньше и составляет 3.5 и 1.5°C . Летом число дней с экстремально высокими значениями температуры (95%-й перцентиль функции распределения для 1981–2010 гг.) уже в середине XXI в. вырастет в 5–6 раз, а к концу века даже для умеренного сценария составит ~ 40 дней. Для сезонных осадков характерна сильная межгодовая изменчивость, на фоне которой зимой в моделях отмечается статистически незначимый рост, а летом к концу XXI в. ожидается существенное

уменьшение осадков на 15 и 40% для сценариев SSP585 и SSP245 соответственно. При этом летом не ожидается статистически значимого снижения интенсивности и экстремальности осадков, а зимой доля экстремальных осадков в общей сумме осадков существенно растет – от 25 до 35%. Отсутствие снижения числа дней с экстремальными осадками летом, несмотря на существенное уменьшение их сезонных сумм, может объясняться ростом вклада конвективных осадков за счет снижения вклада обложных осадков. Такая тенденция отмечается в последние десятилетия по результатам анализа эмпирических данных [16]. Важно отметить, что в ближайшие два десятилетия прогнозируемые изменения практически не зависят от анализируемых сценариев антропогенного воздействия.

Представленные тенденции согласуются с результатами расчетов по модели GFDL-CM3 из ансамбля моделей климата предыдущего поколения CMIP5, которые показывают небольшое увеличение повторяемости экстремальных осадков (для годовых значений) к концу XXI в. для побережья Крымского п-ова [4]. В работе [34] по данным шести моделей проекта CMIP6 в регионе Севастополя отмечается продолжение современных тенденций роста температуры и также индекса засушливости Селянинова в XXI в., что может негативно отразиться на развитии сельского хозяйства. Это согласуется с тенденциями, полученными в данной работе для Крыма в целом.

Следует отметить, что ввиду достаточно грубого пространственного разрешения глобальных моделей климата, важные эффекты, связанные с орографией и пространственными контрастами свойств подстилающей поверхности, могут недостаточно корректно воспроизводиться в моделях, поэтому необходимо использовать региональные модели климата для более реалистичных и детализированных оценок. Как показали эксперименты с региональной моделью для Черноморско-Каспийского региона [7], и рост температуры, и летнее уменьшение осадков в регионе происходят на $\sim 30\%$ интенсивнее, чем в глобальной модели грубого пространственного разрешения. Для корректного воспроизведения интенсивности конвективных осадков и их изменений при потеплении климата необходимо использовать негидростатические модели с еще более детальным разрешением (≤ 1 км) [26].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешина М.А., Семенов В.А., Чернокульский А.В. Исследование роли глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа по результатам экспериментов с моделью климата //

- Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 3. С. 59–75.
2. *Алешина М.А., Торопов П.А., Семенов В.А.* Изменения температурно-влажностного режима Черноморского побережья Кавказа в период 1982–2014 гг. // Метеорология и гидрология. 2018. № 4. С. 41–53.
 3. *Бардин М.Ю. и др.* Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 29–45.
 4. *Вышкваркова Е.В., Воскресенская Е.Н.* Изменение полей экстремальных осадков на территории Крыма и в прибрежной зоне Черного моря в XXI веке // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 4. С. 86–89.
 5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2020. 96 с.
 6. *Елисеев А.В., Семенов В.А.* Изменения климата Арктики в XXI веке: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата // ДАН. 2016. Т. 471. № 2. С. 214–218.
 7. *Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е.* Моделирование изменений климата в Черноморском регионе в XXI столетии // Морской гидрофиз. журн. 2015. № 2 (182). С. 3–14.
 8. *Коваленко О.Ю., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н.* Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в причерноморском регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 2. С. 42–62.
 9. *Матвеева Т.А., Гущина Д.Ю., Золина О.Г.* Крупномасштабные индикаторы экстремальных осадков в прибрежных природно-экономических зонах европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 20–32.
 10. *Мохов И.И., Семенов В.А.* Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–28.
 11. *Полонский А.Б., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н.* Статистические характеристики циклонов и антициклонов над Черным морем во второй половине XX века // Морской гидрофиз. журн. 2007. № 6. С. 47–58.
 12. *Полонский А.Б., Кибальчич И.А.* Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 5–17.
 13. *Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М.* Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
 14. *Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V.* A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. № 10. P. 105004.
 15. *Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Impact of climate changes over the extratropical land on permafrost dynamics under RCP scenarios in the 21st century as simulated by the IAP RAS climate model // Russian Meteorol. Hydrol. 2013. V. 38. № 7. P. 456–464.
 16. *Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O. et al.* Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. № 4. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
 17. *Christiansen B.* Understanding the Distribution of Multimodel Ensembles // J. of Climate. 2020. V. 33. № 21. P. 9447–9465.
 18. *Croitoru A. E., Chitoroiu B. C., Todorova V. I. et al.* Changes in precipitation extremes on the Black Sea Western Coast // Global and Planetary Change. 2013. V. 102. P. 10–19.
 19. *Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Development. 2016. V. 9. № 5. P. 1937–1958.
 20. *Gelfan A., Semenov V.A., Gusev E. et al.* Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability // Hydrol. and Earth System Sci. 2015. V. 19. № 6. P. 2737–2754.
 21. *Gleckler P.J., Taylor K.E., Doutriaux C.* Performance metrics for climate models // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2008. V. 113. № D6. <https://doi.org/10.1029/2007jd008972>
 22. *Harris I., Osborn T.J., Jones P. et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Sci. data. 2020. T. 7. № 1. C. 1–18.
 23. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. V. 10.
 24. *Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S. et al.* Intense Cyclones in the Black Sea Region: Change, Variability, Predictability and Manifestations in the Storm Activity // Sustainability. 2020. V. 12. № 11. P. 4468.
 25. *Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al.* IPCC, 2021. Climate Change 2021 – the Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge Univ. Press. 2021. August.
 26. *Meredith E.P., Maraun D., Semenov V.A. et al.* Evidence for added value of convection-permitting models for studying changes in extreme precipitation // J. Geophys. Res. Atmospheres. 2015. V. 120. № 24. P. 12500–12513. <https://doi.org/10.1002/2015JD024238>
 27. *Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D. et al.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // Nature Geosci. 2015. V. 8. № 8. P. 615.
 28. *Pierce D.W., Barnett T.P., Santer B.D. et al.* Selecting global climate models for regional climate change studies // Proc. National Acad. Sci. 2009. V. 106. № 21.

- P. 8441–8446.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0900094106>
29. *Sakalli A., Bağusta N.* Sea surface temperature change in the Black Sea under climate change: A simulation of the sea surface temperature up to 2100 // *Int. J. Climatol.* 2018. V. 38. № 13. P. 4687–4698.
 30. *Serreze M.C., Barry R.G.* Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // *Global and planetary change.* 2011. V. 77. № 1–2. P. 85–96.
 31. *Trenberth K.E.* Changes in precipitation with climate change // *Climate Res.* 2011. V. 47. № 1–2. P. 123–138.
<https://doi.org/10.3354/cr00953>
 32. *Van Vuuren D.P., Kriegler E., O'Neill B.C. et al.* A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture // *Climatic Change.* 2014. T. 122. № 3. С. 373–386.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1>
 33. *Vyshkvarkova E.* Changes in extreme precipitation over the North Caucasus and the Crimean Peninsula during 1961–2018 // *J. Hung. Meteorol. Serv.* 2021. V. 125. P. 321–336.
 34. *Vyshkvarkova E., Rybalko E., Marchukova O. et al.* Assessment of the Current and Projected Conditions of Water Availability in the Sevastopol Region for Grape Growing // *Agronomy.* 2021. V. 11. № 8. P. 1665.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 551.509.54,556.5,551.513.7

**ПРОГНОЗ ВЫПАДЕНИЯ ОСАДКОВ В РАЙОНЕ АЙ-ПЕТРИ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ¹**© 2022 г. А. С. Лубков^{a, b, *}, Е. Н. Воскресенская^a, О. Ю. Сухонос^a^aИнститут природно-технических систем,
Севастополь, 299011 Россия^bСевастопольский государственный университет,
Севастополь, 299053 Россия

*e-mail: andrey-ls2015@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.12.2021 г.

После доработки 14.02.2022 г.

Принята к публикации 28.02.2022 г.

Предложен усовершенствованный метод прогнозирования месячных осадков в горном Крыму на основе модели искусственной нейронной сети. В качестве входных параметров модели использовался набор климатических индексов глобальной системы океан–атмосфера за 1948–2020 гг., которые рассчитывались на основе данных реанализа NCEP/NCAR и HadISST1. Верификация модели проведена для контрольного периода 2007–2020 гг. Показана возможность сезонного прогноза осадков с заблаговременностью до 6 мес. Обнаружено, что модель способна удовлетворительно прогнозировать общее количество осадков в зимние, летние и осенние (сентябрь и октябрь) месяцы. При этом прогноз осадков в зимний период в горном Крыму особенно ценен с точки зрения наполнения местных водохранилищ, поскольку именно в этот период года выпадает ~70% их годовой суммы. Показано, что прогнозировать осадки на зимний сезон возможно в октябре и со сравнительно более высоким качеством прогноза – в декабре. Мера мастерства прогноза составила 62 и 56% соответственно. В апреле можно прогнозировать летние осадки и осадки в сентябре–октябре (мера мастерства прогноза составляет 55%). Параллельно с осадками проверена и подтверждена возможность сезонного прогнозирования атмосферного давления.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, долгосрочный прогноз, модель прогнозирования погоды, моделирование, Ай-Петри, Крым, система океан–атмосфера.

DOI: 10.31857/S0321059622040137

ВВЕДЕНИЕ

Территория Крымского п-ова характеризуется низкой обеспеченностью водными ресурсами. Средняя густота речной сети в регионе составляет 0.22 км/км². При этом в горной части она достигает 0.7, а в равнинной – 0.12 км/км² [2]. Ресурсы речного стока 50%-й обеспеченности для горной части полуострова составляют 0.86, а в равнинной части – 0.13 км³ [5]. В последнее 8 лет с 2014 г. отмечается рост населения на территории Крыма, особенно в прибрежных регионах, что приводит к

росту нагрузки на водные ресурсы полуострова. Соответственно, проблема дефицита пресной воды в настоящее время – одна из наиболее актуальных для Крыма. Объем пресной воды в водохранилищах меняется от года к году и существенно зависит от объема осадков, выпадающих в горном Крыму. Это иллюстрируют спутниковые снимки нескольких водохранилищ Крыма, приведенные на рис. 1. Питающие водохранилища воды имеют паводковый режим с преобладанием стока в холодное время года (с ноября по апрель) [1].

По состоянию на 2019–2020 гг. среднегодовой баланс запасов воды в водохранилищах Крыма был отрицательным, а к январю 2021 г. объем воды во многих был близок к критическому (рис. 1). Такая ситуация в течение отмеченных лет была вызвана несколькими причинами. Наиболее существенная из них состояла в том, что в течение 2020 г. гидрометеорологические условия в регионе характеризовались скудными осадками. Тогда

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Института природно-технических систем «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан–атмосфера и антропогенного воздействия» (государственная регистрация 121122300072-3) и стратегического проекта № 3 программы «Приоритет-2030» Севастопольского государственного университета (государственная регистрация 121121700314-3).



Рис. 1. Пример изменений площади водного зеркала двух водохранилищ Крыма по данным изображений спутника Sentinel-2, для которых рассчитан индекс MNDWI [34]; дата приведена в формате “день.месяц.год”.

на метеорологической станции на горе Ай-Петри было зафиксировано рекордно низкое годовое количество осадков — 533 мм, что соответствует лишь половине многолетней годовой нормы. Важно отметить, что проблема нехватки воды в Крыму в засушливые годы была известна и ранее [4].

В настоящее время решение проблемы сложившейся катастрофической ситуации в стратегически важном регионе было вынесено на правительственный уровень страны. При этом совершенно ясно, что своевременное прогнозирование осадков представляется одной из наиболее важных проблем для устойчивого развития региона.

К сожалению, сезонные прогнозы с заблаговременностью от месяца до года все еще остаются нерешенной проблемой, особенно на региональном масштабе. Требования, предъявляемые к качеству прогноза, не могут быть выполнены с использованием современных глобальных климатических моделей. Поэтому в данном исследовании рассмотрена возможность прогнозирования осадков в горном Крыму, а также дополнительно и приземного давления с использованием модели на основе метода нейронных сетей (НС).

На сегодня вопрос о возможности прогнозирования осадков методами, основанными на использовании различных НС, актуален и привлекает внимание исследователей разных стран. В последнее десятилетие появились работы, в которых предложены модели для такого прогнозирования в месячном и сезонном масштабе в отдельных регионах земного шара. В частности, некоторые авторы применяли разные НС для прогнозирования муссонных осадков в Индии

[29, 30] и Шри-Ланке [24], прогнозирования осадков в Австралии [9, 11, 22], Иордании [6], Китае [14] и Греции [23]. Обычно исследователями проводится сравнение различных методов нейросетевого моделирования. При этом однонаправленная гетероассоциативная НС с одним или несколькими скрытыми слоями (часто такую схему НС называют многослойным персептроном) показала конкурентные результаты [11, 14, 29, 30, 35].

Модели для прогнозирования осадков с использованием НС можно условно разделить на две группы по критериям входных параметров: использующие региональные метеорологические характеристики за некоторый предыдущий период (осадки, минимальная и максимальная температура, влажность, различные индексы осадков и температуры) и использующие глобальные климатические сигналы (Южное колебание Эль-Ниньо (ЭНЮК), Тихоокеанская декадная осцилляция (ТДО), Атлантическая мультideкадная осцилляция (АМО), Индоокеанский диполь (ИОД) и др.). При этом удовлетворительное и даже высокое качество моделирования было достигнуто как в первом случае, например в [6, 9, 29], так и во втором [11, 22, 29].

Ранее авторы настоящей статьи успешно применяли НС для прогнозирования явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью до 9 мес. [16, 17], частоты интенсивных циклонов в Черноморском регионе — с заблаговременностью до 6 мес. [20], а первоначально — для стока р. Дунай с заблаговременностью до 3 мес. [15]. При этом во всех этих случаях в качестве входных параметров в НС использовались только атмосферные ин-

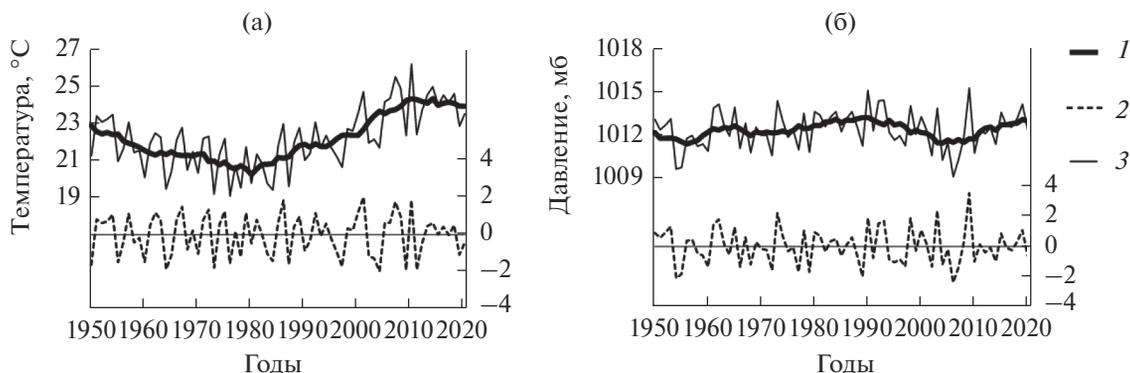


Рис. 2. Низкочастотные (линия 1, левая шкала), высокочастотные (линия 2, правая шкала) компоненты и исходные ряды (линия 3, левая шкала) температуры воздуха (а) и давления на уровне моря (б) в августе.

дексы дальнедействующих связей в системе океан–атмосфера.

В настоящей работе уделено особое внимание выбору параметров, входящих в НС, и предложен подход к моделированию рядов метеорологических данных с их разделением на несколько компонент.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Используемые базы данных

В работе использованы следующие массивы данных:

среднемесячные ряды давления на уровне моря в Крыму взяты из реанализа ERA5 за период 1950–2020 гг., пространственное разрешение которого – $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (ряды составлялись из двух частей реанализа, учтены расхождения рядов, ряд 1950–1978 гг. проверен на ошибки на основе сравнения со стационарными наблюдениями на метеостанции г. Симферополя, ряды которой доступны в базе международного обмена данными NOAA);

данные о сумме месячных осадков на станции Ай-Петри взяты из базы данных международного обмена NOAA за период 1950–2020 гг.;

геопотенциальная высота, меридиональная, зональная составляющие ветра на изобарическом уровне 500 мб, используемые в качестве атмосферных входных индексов в НС, взяты из реанализа NCEP/NCAR, пространственное разрешение которого составляет $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, за период 1948–2020 гг.;

массив реконструированных данных о ТПО HadISST, имеющий разрешение $1^\circ \times 1^\circ$, использовался для поиска и расчета океанических индексов, входящих в НС за период 1940–2020 гг.

Подготовка данных

В ранних исследованиях авторов данной статьи [15–20] показано, что количество входных индексов ограничено вычислительными возможностями: для оптимальной работы модели рекомендовано использовать ≤ 25 . Разложение исходного ряда на несколько статистически несвязанных компонент и их последующее отдельное моделирование предполагают использование нескольких наборов индексов, подаваемых для моделирования каждой компоненты. Такой подход позволит значительно увеличить количество используемых индексов и, следовательно, улучшить качество моделирования.

Из [10] известно, что океанические параметры имеют несколько мод долгопериодной изменчивости, среди которых основными считаются АМО [13, 28] с типичным периодом 60–70 лет, ТДО [18, 36] с квази-двадцатилетним временным масштабом и межгодовые колебания САК, ЭНЮК и другие [31] с периодом чередования экстремальных фаз – 2–7 лет. Это основные режимы глобальной климатической системы, присутствующие как океану, так и атмосфере. При этом в атмосферных полях выделяется более десятка режимов с временным масштабом от нескольких месяцев до нескольких лет [8, 33].

С учетом типичных периодов основных климатических режимов атмосферы и океана моделируемые параметры разложены на две компоненты. Исходные ряды сглаживались 9-летним фильтром отдельно для каждого месяца. Примеры рядов температуры и атмосферного давления на уровне моря, приведенные на рис. 2, ярко демонстрируют наличие междесятилетней и десятилетней изменчивости. Сглаженный ряд и ряд разности исходных и сглаженных значений далее будем называть низкочастотной и высокочастотной компонентами соответственно. Эти два новых ряда моделировались в текущей работе неза-

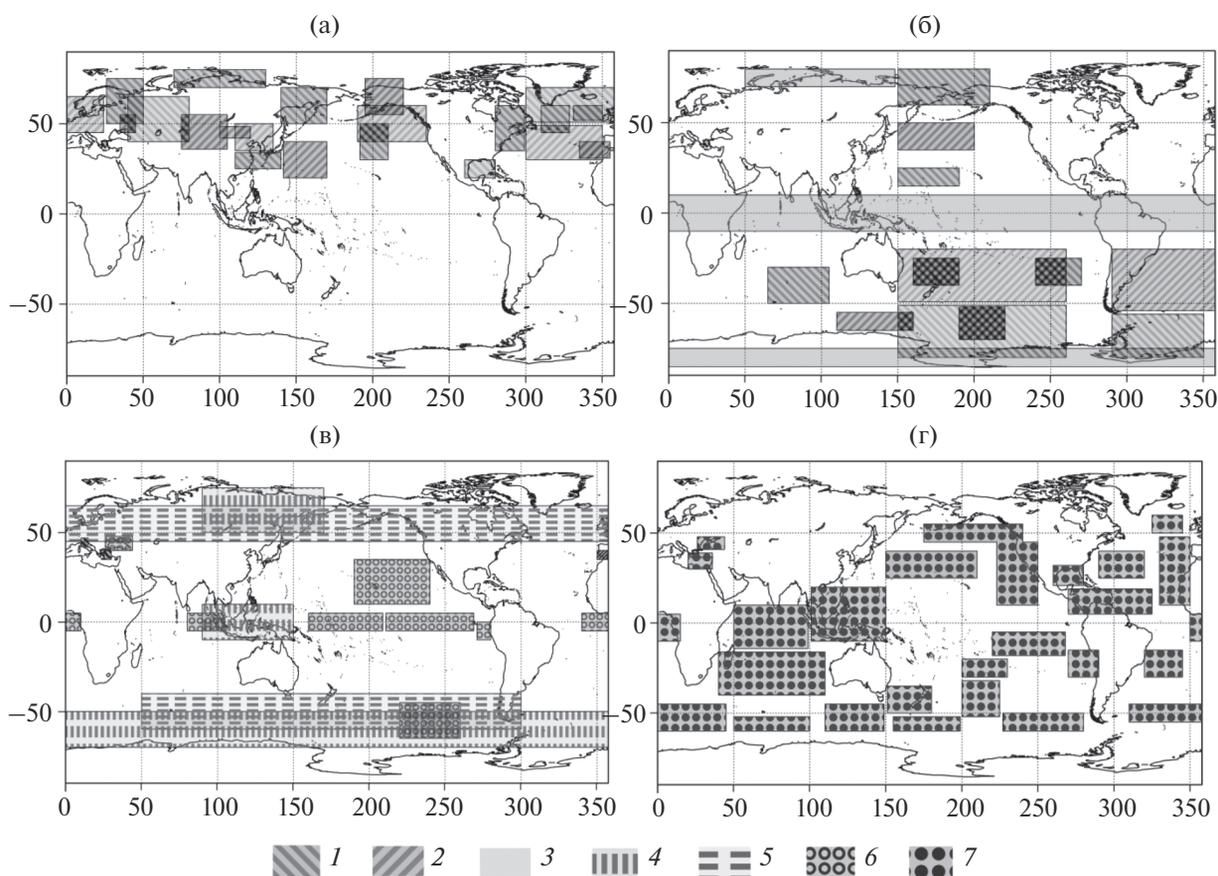


Рис. 3. Локализация пространственного расположения индексов. Области индексов геопотенциальной высоты на изобарической поверхности 500 мб отмечены штриховкой – 1, 2 и 3; меридиональной и зональной составляющих ветра – 4 и 5 соответственно, ТПО – 6 и сглаженные 9-летним средним скользящим фильтром ряды ТПО – 7.

висимо друг от друга, а после моделирования выполнялось их сложение.

Рассмотрим алгоритм выбора входных сигналов для модели НС. Для прогнозирования высокочастотной составляющей входные сигналы в НС выбирались в несколько этапов. На первом этапе была изучена возможная статистическая взаимосвязь между моделируемыми метеорологическими характеристиками и глобальными метеорологическими (геопотенциал, зональная и меридиональная составляющие скорости ветра на изобарическом уровне 500 мб) и океанологическими (температура поверхности океана (ТПО)) полями. Статистическая связь оценивалась с помощью коэффициентов корреляции, которые рассчитывались в каждой узловой точке поля для каждого месяца отдельно. Глобальные метеорологические и океанологические поля сравнивались с осадками на станции Ай-Петри и давлением на уровне моря, осредненным по Крымскому региону, с временным сдвигом от 1 мес. до 2 лет. Анализ глобальных полей привел к обобщению областей (рис. 3), в которых чаще наблюдались значительные коэффициенты корреляции (при

длине ряда 70, и $\alpha = 0.01$ коэффициент корреляции $r = 0.195$). В пределах этих областей выполнялось осреднение. В случае нескольких связанных областей индексы рассчитывались как сумма модулей корреляций всех таких областей. Использовались нормированные на стандартное отклонение аномалии.

Большая часть индексов геопотенциальной высоты в Северном полушарии в целом соответствует месту локализации мод, определенных Э.Г. Барнстоном и Р.Е. Ливези [8] (рис. 3а). Остальные области расчетов индексов геопотенциала представлены на рис. 3б. Кроме того, рассчитаны индексы Средне-Средиземноморского и Западно-Средиземноморского колебаний [19, 26] (рис. 3в).

На рис. 3в (штриховки “4” и “5”) представлены области расположения индексов, выделенных в глобальных полях меридиональной и зональной компонент скорости ветра. При этом особенностью расчета меридиональной компоненты скорости ветра было осреднение модуля его скорости в выделенной области. Такой индекс может служить индикатором типа атмосферной циркуляции:

положительные значения индекса соответствуют меридиональному типу, а отрицательные — зональному.

Штриховкой “6” на рис. 3в выделены области расположения индексов, полученных по аномалиям ТПО. В их число вошли известные аномалии: Эль-Ниньо — Южное колебание [31], Атлантическая мода, подобная ЭНЮК [32], и Индоокеанский диполь [27], имеющие глобальные климатические проявления [7, 21, 25, 32].

Для моделирования низкочастотной составляющей в качестве входных данных использовались только поля ТПО, сглаженные 9-летним фильтром для каждого месяца по отдельности. Выделенные области ТПО представлены на рис. 3г (штриховка “7”). Таким образом отобрано 54 индекса: 29 — для моделирования высокочастотной и 25 — для моделирования низкочастотной составляющих.

Описание модели

Для моделирования низкочастотной и высокочастотной составляющих прогнозируемых климатических характеристик использовался многослойный перцептрон с одним скрытым слоем; функция активации нейронов НС — сигмоидальная биполярная [3, 12, 15].

Моделирование каждого месяца проводилось независимо. Среднемесячные ряды значений моделируемого параметра и использованных входных индексов были разделены на обучающую, тестирующую и контрольную выборки. В текущей работе увеличили размер обучающей выборки с 28–30 лет (как в работах [16, 17, 20]) до 38 лет за период 1950–1987 гг. Тестовая выборка при этом сократилась и составила всего 19 лет — 1988–2006 гг. В качестве контрольной выборки рассматривался 14-летний период за 2007–2020 гг.

Обучение модели проводилось на основе алгоритма обратного распространения ошибки [12] с некоторыми поправками. Обычно максимум обучения определяется целевой функцией, рассчитываемой на каждом шаге обучающей выборки, и формулируется, как правило, в виде квадратичной суммы разностей между фактическими и ожидаемыми значениями выходного сигнала [3, 12]. Если достижение модельных расчетов и заведомо известных значений с некоторой требуемой точностью невозможно, максимум обучения определяется как глобальный минимум целевой функции [3]. В поставленной задаче установить требуемую точность модельных расчетов невозможно ввиду недостаточной изученности моделируемых параметров. При этом обучающая выборка состоит всего из 38 значений, что усложняет определение максимума обучения классическим методом. В этой связи для определения максимума обуче-

ния применим метод, описанный в работе [15]. Суть обучения НС этим методом заключается в следующем. Корректировка весов нейронов НС осуществляется с помощью классической целевой функции, однако обучающая выборка повторяется многократно, при этом значения весов сохраняются. На каждой итерации повторения обучающей выборки рассчитываются коэффициенты корреляции с обучающей ($r_{\text{обуч}}$) и тестовой ($r_{\text{тест}}$) выборками. Максимум обучения НС должен удовлетворять двум условиям: осуществляется поиск итерации, на которой наблюдался глобальный максимум $r_{\text{обуч}}$, при этом должно выполняться неравенство $|r_{\text{тест}} - r_{\text{обуч}}| < 0.15$. В случае, если второе условие не выполняется, за максимум обучения принимается ближайшая итерация, соответствующая второму условию. Однако недостаток этого метода — необходимость контрольной проверки моделируемых результатов. Это связано с тем, что в процессе поиска максимума обучения НС используется тестирующая выборка и, следовательно, возникает необходимость использовать независимую (контрольную) выборку для объективной оценки возможностей модели.

Адаптация модели включала в себя несколько этапов. На этапе предварительной подготовки данных повторно оценивалась статистическая связь между прогнозируемыми рядами данных и значениями входящих в модель НС индексов (геопотенциал, скорость ветра, ТПО) с временным сдвигом последних от одного месяца до двух лет опережения для высокочастотной составляющей и от одного года до десяти лет — для низкочастотной. На основе коэффициента корреляции проводилось ранжирование статистических связей с индексами с различным сдвигом. Поскольку увеличение числа входных параметров существенно влияет на скорость вычисления, в исследовании для моделирования высокочастотной и низкочастотной составляющих использовано не более 22 и 16 входных индексов соответственно.

Ранее в работе [15] утверждалось, что поведение НС не всегда может быть предсказуемо. Поэтому моделирование проводилось с перебором всех возможных комбинаций индексов на входе, выбранных на предварительном этапе. В настоящей работе НС, имеющая определенный набор входных сигналов, называется конструкцией модели.

Для каждой конструкции НС проводилось обучение. Данные о конструкции НС в момент максимума обучения (количество нейронов скрытого слоя, итерация обучения, корреляционные оценки на тестовой и обучающей выборке) заносились в лог-файл. Далее проводилось ранжирование по коэффициенту корреляции конструкций НС с тестовой выборкой. По результатам

ранжирования отбирались 20 лучших конструкций НС и рассчитывался ансамбль как среднее арифметическое выбранных конструкций. Качество ансамбля оценивалось в сравнении с контрольной выборкой. Для такой оценки использовались следующие инструменты.

1. Корреляция Пирсона:

$$r = \frac{\text{cov}(x_i, y_i)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения выборок x и y , которые представляют собой результат моделирования и наблюдаемые значения.

2. Отношение среднего квадратичного отклонения модели относительно наблюдаемых значений (RMSE) к среднеквадратическому отклонению наблюдаемого ряда (СКО или σ):

$$\text{RMSE}/\sigma = \frac{\sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{n}}}{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}} = \sqrt{\frac{(n-1) \sum (x_i - y_i)^2}{n \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где n – длина ряда контрольной выборки, x_i – модель, y_i – наблюдаемая величина, \bar{y} – среднее наблюдаемого ряда, i – год контрольной выборки.

3. Мера мастерства прогноза:

$$S = \frac{E - E_0}{E_1 - E_0} \times 100\%,$$

где E – абсолютное отклонение модели, E_0 – абсолютное отклонение относительно среднего на контрольном периоде, E_1 – идеальная модель. Для идеальной модели справедливо $E_1 = 0$. Получим:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}| - \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}|} \times 100\%, \quad (3)$$

где n , x_i , y_i и i – по аналогии с (2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Осадки на станции Ай-Петри

Основная задача настоящей работы – создание прогностической модели для оценки будущей наполняемости отдельных водохранилищ Крыма. Осадки в высокогорных районах – основной фактор их наполнения [1]. Наиболее полные данные об осадках в горах Крыма имеются на станции Ай-Петри, расположенной на высоте 1180 м. На рис. 4 представлены оценки модельных расчетов с заблаговременностью прогноза от 1 до 6 мес. (коэффициенты корреляции на рис. 4а, RMSE/ σ на рис. 4б). Для весенних месяцев (март,

апрель и май), а также для августа и ноября прогнозировать осадки оказалось невозможным: сравнение наблюдаемых и рассчитанных с использованием модели значений показало незначимые корреляции ($r < 0.42$ с длиной ряда 14 значений и $\alpha = 0.01$) и/или RMSE модели превышает стандартное отклонение (RMSE/ $\sigma > 1$).

В отличие от равнин, в горах пик атмосферных осадков приходится на холодную половину года. В среднем 40% годовых осадков выпадает зимой (декабрь, январь, февраль). Именно в этот период формируется основной водоносный потенциал крымских водохранилищ. Прогноз этого сезона возможен как в ноябре с заблаговременностью 4 мес. (заблаговременность считалась для последнего месяца сезона – февраля), так и в декабре с заблаговременностью 2 мес. (рис. 5а). Для прогноза с заблаговременностью 4 мес. $r = 0.54$, RMSE = 111 мм, мера мастерства модели равна 56%. Для прогноза с заблаговременностью 2 мес. $r = 0.65$, RMSE = 101 мм, мастерство модели $S = 62\%$.

Таким образом, прогноз с меньшей заблаговременностью несколько лучше воспроизводит осадки зимой. При этом сезон 2017–2018 гг. модель НС воспроизвела плохо: количество осадков занижено на 69–75% (рис. 5). Летом и в начале осени (июнь–октябрь) суммарно выпадает 30% годовых осадков. Интенсивные, но непродолжительные осадки и даже ливни в этот период не могут кардинально повлиять на накопление воды в водохранилищах Крыма. Прогнозировать количество осадков для этого временного периода возможно в апреле, т. е. с заблаговременностью 6 мес. (заблаговременность считалась для последнего месяца – октября). Поскольку моделирование осадков в августе не представляется возможным, для этого месяца будем использовать прогноз лишь средней 9-летней составляющей. Результаты модельных расчетов представлены на рис. 5б. Модель воспроизвела количество осадков удовлетворительно: $r = 0.64$, RMSE = 87 мм, мастерство модели $S = 55\%$. Наибольшие отклонения от наблюдаемых значений отмечались в 2016 г. (занижение на 44%) и 2017 г. (завышение на 74%).

Давление на уровне моря

Прогноз атмосферного давления на уровне моря может служить хорошим вспомогательным инструментом для интерпретации прогнозов осадков при условии наличия статистической связи. Анализ статистических связей, выполненный отдельно для каждого месяца, показал наличие значимых коэффициентов корреляции (длина ряда – 70 значений, $\alpha = 0.001$, $r_{\text{крит}} = 0.23$) в январе ($r = -0.67$), феврале ($r = -0.39$), марте ($r = -0.45$), июне ($r = -0.30$), сентябре ($r = -0.53$),

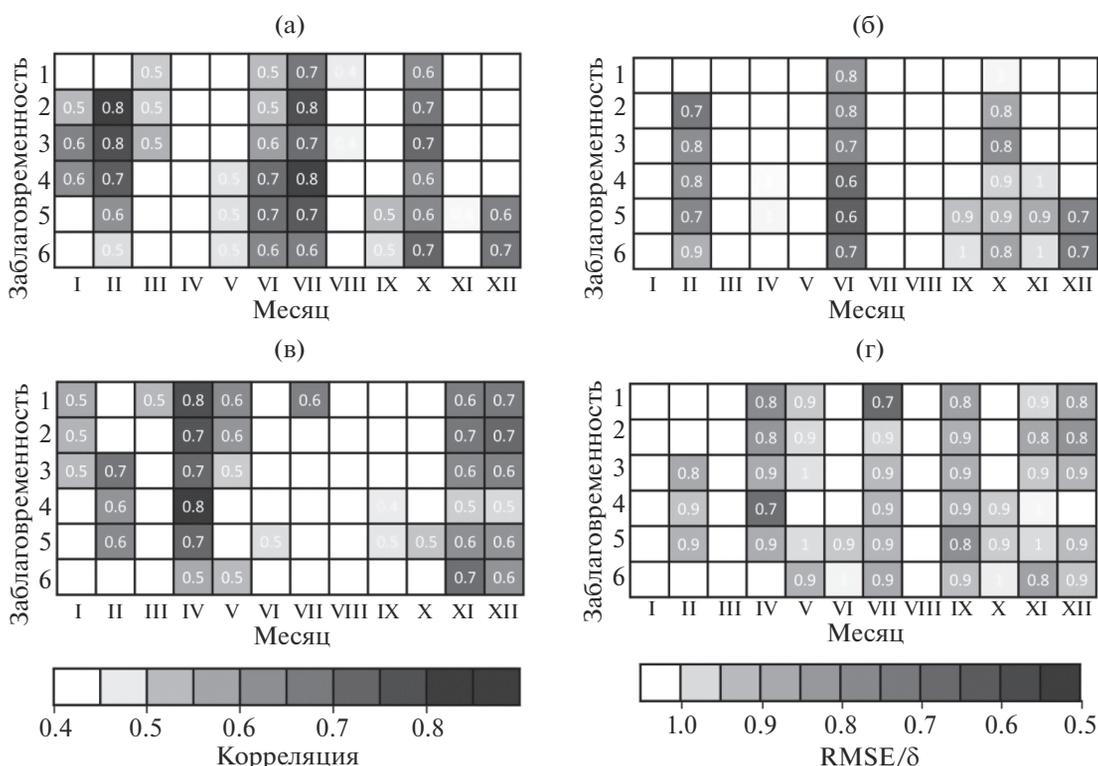


Рис. 4. Диаграммы коэффициента корреляции (а, в) и $RMSE/\sigma$ (б, г) рассчитанные для контрольного периода (2007–2020 гг.) в зависимости от месяца, для которого происходило моделирование, и заблаговременности прогноза для осадков на станции Ай-Петри (а, б) и давления (в, г).

октябре ($r = -0.30$), ноябре ($r = -0.59$) и декабре ($r = -0.67$).

Результаты оценки модельного прогноза давления на контрольной выборке, приведенные на рис. 4в и 4г, показали, что летом, в сентябре, октябре, а также в марте прогноз аномалий среднемесячного давления практически невозможен. Для ноября и декабря прогнозирование среднемесячных значений давления допустимо на удовлетворительном уровне с заблаговременностью 1–3, 5 и 6 мес. ($r = 0.6–0.69$, $RMSE/\sigma = 0.78–0.95$). В апреле модель показала хорошие результаты с заблаговременностью прогноза от 1 до 5 мес. ($r = 0.69–0.82$, $RMSE/\sigma = 0.66–0.86$). Заблаговременность прогноза удовлетворительного качества в январе не превышает ≤ 3 мес., в феврале – 5, в марте – 1, а в мае – 2 мес. При этом в январе и марте $RMSE$ выше среднеквадратического отклонения.

Рассмотрим подробно воспроизводимость давления на контрольной выборке в месяцы, для которых показана наиболее высокая статистическая связь с осадками и отмечена возможность прогноза. На рис. 6 приведено несколько графиков модельных расчетов с различной заблаговременностью и наблюдаемое давление в ноябре, декабре, феврале и апреле.

Для ноября (рис. 6а) обе модели с различной заблаговременностью прогноза имеют близкие коэффициенты корреляции (0.66–0.68) и $RMSE/\sigma$ (0.82–0.84), при этом наблюдаются неточности в воспроизведении давления. Воспроизведение декабрьского давления моделью НС (рис. 6б) в целом достаточное, кроме 2009 г. Прогноз с заблаговременностью 2 мес. ($r = 0.69$, $RMSE/\sigma = 0.78$) повторяет наблюдаемое среднемесячное давление точнее прогноза с заблаговременностью 6 мес. ($r = 0.6$, $RMSE/\sigma = 0.92$). Модели с 3- и 5-месячной заблаговременностью (рис. 6в) воспроизводят февральские значения на одинаковом качественном уровне ($r = 0.66–0.61$, $RMSE/\sigma = 0.85–0.88$). Для 2015–2017 гг. модельные расчеты заметно занижают давление. Наилучшим образом модель НС воспроизводит давление в апреле (рис. 6г). При этом прогноз с заблаговременностью 4 мес. ($r = 0.83$, $RMSE/\sigma = 0.66$) несколько точнее прогноза с заблаговременностью 2 мес. ($r = 0.75$, $RMSE/\sigma = 0.79$).

ВЫВОДЫ

Предложенный в работе подход к ассимиляции данных позволил удвоить количество входных предикторов и, следовательно, увеличить потенциал предсказуемости модели НС. Проверка

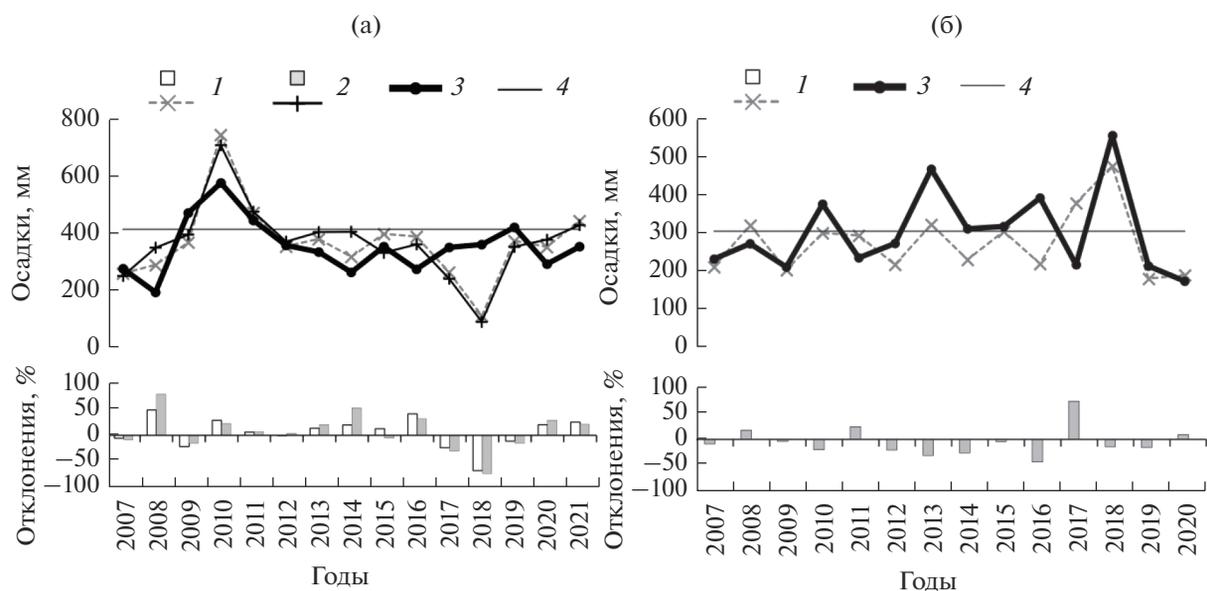


Рис. 5. Модельный прогноз на контрольной выборке: а – с заблаговременностью 2 (1) и 4 мес. (2) в зимний сезон (дек., янв., фев.); б – с заблаговременностью 6 мес. (1) в летний и осенний сезоны (июнь, июль, август, сентябрь, октябрь), наблюдаемые осадки (3) и средние осадки в соответствующие сезоны, рассчитанные для периода 1950–2020 гг. (4); диаграмма снизу – отклонение модельных расчетов от наблюдений, %.

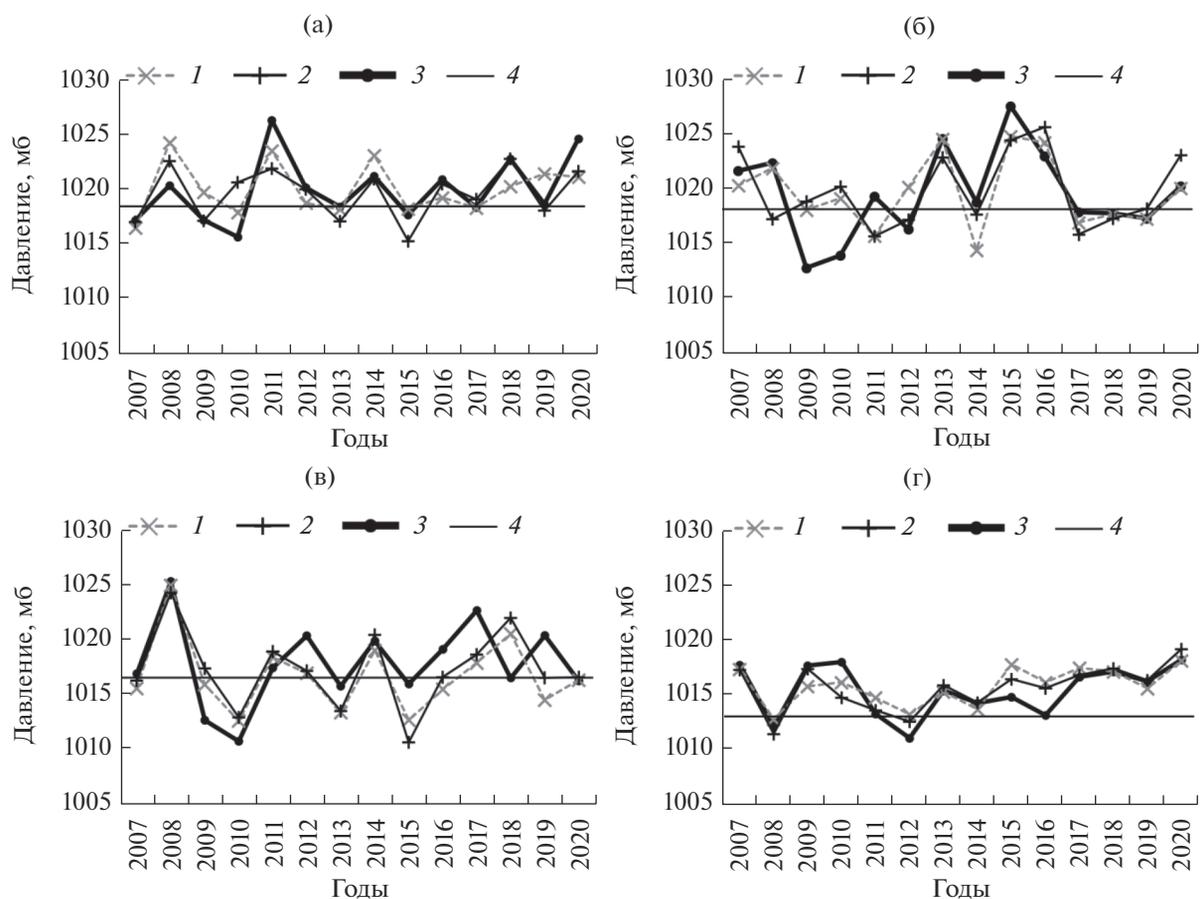


Рис. 6. Модельные расчеты давления на уровне моря в контрольный период для ноября (а) с заблаговременностью прогноза 2 (1) и 6 мес. (2), декабря (б) с заблаговременностью прогноза 2 (1) и 6 мес. (2), февраля (в) с заблаговременностью прогноза 3 (1) и 5 мес. (2), для апреля (г) с заблаговременностью прогноза 2 (1) и 4 мес. (2), наблюдаемые значения (3) и среднее давление в соответствующие месяцы, рассчитанные для периода 1950–2020 гг. (4).

качества моделирования показала, что прогнозирование осадков в районе станции Ай-Петри в зимние и летние месяцы, сентябре и октябре представляется возможным с заблаговременностью 2–6 мес. В эти месяцы в среднем выпадает ~70% годовой нормы осадков.

Для зимних осадков имеется потенциал предсказуемости в октябре, а сравнительно более точный прогноз на зимний сезон можно получить в декабре. Мастерство модели на контрольной выборке составило 56 и 62% соответственно. При этом прогноз осадков на зимний сезон имеет большое значение, так как в этот период максимальное количество осадков выпадает в горах, что обуславливает формирование водности базовых крымских водохранилищ.

Прогноз летних и осенних (июнь–октябрь) осадков можно составлять в апреле (Мастерство модели – 55%). Однако этот период менее важен для прогнозирования наполняемости водохранилищ Крыма, поскольку летние осадки, в том числе сильные дожди, существенного влияния на нее не оказывают.

Анализ воспроизводимости моделью давления на уровне моря показал возможность заблаговременного прогнозирования для ноября, декабря, января, февраля, апреля и мая. При этом давление может быть хорошим вспомогательным инструментом для интерпретации прогноза осадков.

Полученные результаты могут быть использованы для ранней оценки водоснабжения в большинстве регионов Крыма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречушникова М.Г., Косицкий А.Г., Айбулатов Д.Н., Школьный Д.И., Алексеева А.А., Карашова М.И. Трансформация стока воды и осадконакопление Чернореченского водохранилища // Вест. Московского уни-та. Сер. 5, География. 2020. № 1. С. 97–104.
2. Олиферов А. Н. Тимченко З. В. Реки и Озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с.
3. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
4. Прусов А.В., Миньковская Р.Я., Овчаренко И.А. Резерв пресноводных ресурсов Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. № 19. С. 143–153.
5. Справочник по водным ресурсам / Под ред. Б.И. Стрельца. Киев: Урожай, 1987. 304 с.
6. Aksoy H., Dahamsheh A. Artificial neural network models for forecasting monthly precipitation in Jordan // Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 2009. V. 23. P. 917–931.
7. Ashok K., Behera S.K., Rao S.A., Weng H., Yamagata T. El Nino Modoki and its possible teleconnection // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. 11007.
8. Barnston G., Livezey R.E. Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns // Monthly Weather Rev. 1987. V. 115. № 6. P. 1083–1126.
9. Deo R.C., Şahin M. Application of the artificial neural network model for prediction of monthly standardized precipitation and evapotranspiration index using hydrometeorological parameters and climate indices in eastern Australia // Atmos. Res. 2015. V. 161–162. C. 65–81
10. Enfield D., Mestas-Nunez A.M. Multiscale variability in global SST and their relationships with tropospheric climate patterns // J. Climate. 1999. V. 12 № 9. P. 2719–2733.
11. Haidar A., Verma B. Monthly Rainfall Forecasting Using One-Dimensional Deep Convolutional Neural Network // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 69053–69063.
12. Haykin S. Neural networks, a comprehensive foundation. N. Y.: Macmillan College Publ. Company, 1994. 823 p.
13. Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P. 17706.
14. Lu W., Chu H., Zhang Z. Application of generalized regression neural network and support vector regression for monthly rainfall forecasting in western Jilin Province, China // J. of Water Supply: Res. and Technol.-Aqua. 2014. V. 64. № 1. P. 95–104.
15. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Kukushkin A.S. Method for reconstructing the monthly mean water transparencies for the northwestern part of the Black Sea as an example // Atmos. Ocean Opt. 2016. V. 29. P. 457–464.
16. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V. Application of a neural network model to forecasting of El Niño and La Niña // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 386. P. 012040.
17. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V. Forecasting El Niño/La Niña and Their Types Using Neural Networks // Russ. Meteorol. Hydrol. 2020. V. 45. P. 806–813.
18. Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M., Francis R.C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production // BAMS. 1997. V. 78. P. 1069–1079.
19. Martin-Vide J., Lopez-Bustins J.A. The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula // Int. J. Climatol. 2006. V. 26. № 11. P. 1455–1475.
20. Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S., Yurovsky A.V., Zhuravskiy V.Y., Evstigneev V.P. Intense Cyclones in the Black Sea Region: Change, Variability, Predictability and Manifestations in the Storm Activity // Sustainability. 2020. V. 12. № 11. P. 4468.
21. McPhaden M.J., Zebiak S.E., Glantz M.H. ENSO as an integrating concept in Earth science // Sci. 2006. V. 314. № 5806. P. 1740–1745.
22. Mekanik F., Imteaz M.A., Gato-Trinidad S., Elmahdi A. Multiple regression and Artificial Neural Network for long-term rainfall forecasting using large scale climate modes // J. Hydrol. 2013. V. 503. P. 11–21.

23. *Moustris K.P., Larissi I.K., Nastos P.T., Paliatos A.G.* Precipitation Forecast Using Artificial Neural Networks in Specific Regions of Greece // *Water Resour. Manage.* 2011. V. 25. P. 1979–1993.
24. *Nagahamulla H.R.K., Ratnayake U.R., Ratnaweera A.* Monsoon rainfall forecasting in Sri Lanka using artificial neural networks // *Proc. 6th Int. Conf. Ind. Inf. Syst.* 2011. P. 305–309.
25. *Polonsky A.B., Basharin D.V.* How strong is the impact of the Indo-Ocean Dipole on the surface air temperature/sea level pressure anomalies in the Mediterranean region? // *Global and Planetary Change.* 2017. V. 151. P. 101–107.
26. *Redolat D., Monjo R., Lopez-Bustins J.A., Martin-Vide J.* Upper-Level Mediterranean Oscillation index and seasonal variability of rainfall and temperature // *Theor. Appl. Clim.* 2019. V. 135. P. 1059–1077.
27. *Saji N., Goswami B., Vinayachandran P., Yamagata T.* A dipole mode in the tropical Indian Ocean // *Nature.* 1999. V. 401. P. 360–363.
28. *Schlesinger M.E., Ramankutty N.* An oscillation in the global climate system of period 65–70 years // *Nature.* 1994. V. 367. № 6465. P. 723–726.
29. *Shukla R.P., Tripathi K.C., Pandey A.C., Das I.M.L.* Prediction of Indian summer monsoon rainfall using Niño indices: A neural network approach // *Atm. Res.* 2011. V. 102. № 1–2. P. 99–109.
30. *Singh P., Borah B.* Indian summer monsoon rainfall prediction using artificial neural network // *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 2013. V. 27 P. 1585–1599.
31. *Trenberth K.E., Caron J.M.* The Southern Oscillation Revisited: Sea Level Pressures, Surface Temperatures, and Precipitation // *J. Climate.* 2000. V. 13. P. 4358–4365.
32. *Vallès-Casanova I., Lee S.-K., Foltz G.R., Pelegri J.L.* On the spatiotemporal diversity of Atlantic Niño and associated rainfall variability over West Africa and South America // *Geophys. Res. Letters.* 2020. V. 47. № 8. P. e2020GL087108.
33. *Wallace J.M., Gutzler D.S.* Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // *Monthly Weather Rev.* 1981. V. 109. P. 784–812.
34. *Xu H.* Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery // *Int. J. of Remote Sensing.* 2006. V. 27 № 14. P. 3025–3033.
35. *Zhang M., Su B., Nazeer M., Bilal M., Qi P., Han G.* Climatic Characteristics and Modeling Evaluation of Pan Evapotranspiration over Henan Province, China // *Land.* 2020. V. 9. № 7. P. 229.
36. *Zhang Y., Wallace J.M., Battisti D.S.* ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 // *J. Climate.* 1997. V. 10. P. 1004–1020.

**ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ**

УДК 628(902.93/94(477.75))

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ
В СРЕДНЕВЕКОВОМ КРЫМУ (СУДАК XIV–XV ВВ.)**© 2022 г. В. В. Майко^а *, А. Л. Чепалыга^б **, В. А. Захаров^с^аИнститут археологии Крыма РАН, Симферополь, 295007 Россия^бИнститут географии РАН, Москва, 119017 Россия^сМузей-заповедник “Судакская крепость”, Судак, 298000 Россия

*e-mail: vadimmaiko1966@mail.ru

**e-mail: tchepalyga@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 13.12.2021 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Обобщены и проанализированы археологические и геологические данные, касающиеся решения проблем водоснабжения и водопотребления в средневековой Сугдее (г. Судак XIV–XV вв.). Установлены основные источники водных ресурсов: два водоносных горизонта подземных вод (верхнеюрские карбонатные и четвертичные террасовые отложения), а также дополнительно атмосферные осадки и конденсационные воды. Определены трассы водоводов и керамических водопроводов от водоносных слоев верхней юры на горе Перчем до городских крепостных стен и описаны основные типы водохозяйственных средневековых объектов, включая бассейны, цистерны, колодцы, бани, фонтаны и др. Выявлен высокий технологический уровень строительства, эксплуатации и ремонта этих сооружений. Предложены примеры возможного использования средневекового опыта для решения современных проблем водоснабжения.

Ключевые слова: водоносные слои, искусственные водоемы, напорные водопроводы, система водоснабжения Сугдеи, средневековые гидротехнические устройства.

DOI: 10.31857/S0321059622040149**ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Целью данного исследования было изучение опыта решения проблем водоснабжения в средневековом Судаке (Сугдее) и выявление возможности использования этого опыта в современных условиях.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1) определить основные источники водных ресурсов;

2) обобщить все известные археологические данные о гидротехнических сооружениях, образующих систему водоснабжения средневековой Сугдеи;

3) попытаться реконструировать основные пути и трассы водопроводов для транспортировки водных ресурсов в Сугдею;

4) выявить возможность использования опыта водоснабжения средневековой Сугдеи применительно к современным условиям кризиса водного хозяйства Крыма.

**ИЗУЧЕННОСТЬ ВОПРОСА
ВОДОСНАБЖЕНИЯ СУГДЕИ**

Научное изучение проблем водоснабжения Крымского п-ова в средневековое время началось в конце 1920–начале 1930-х гг. [13]. В средневековой Сугдее еще в 1926–1927 гг. археологической экспедицией Государственного исторического музея (ГИМ) во главе с А.А. Фоминым была расчищена от завалов цистерна для воды Консульского замка [8]. В 1927 г. экспедицией Государственной академии истории материальной культуры (ГАИМК) г. Ленинграда под руководством Ю.В. Готье в окрестностях Судака проводились и масштабные разведки памятников, связанных с проблемой водоснабжения. В частности, были осмотрены остатки монастырского комплекса с двухапсидным храмом на южных склонах горы Перчем, отмечены развалины водопровода. В 1928 г. этой же экспедицией на территории цитадели Сугдеи-Солдайи было продолжено изучение цистерны Консульского замка. В этих работах удалось установить, что фундаменты цистерны возводились частично на скале, частично

на слое бута, залитого известковым раствором. Зафиксирована и гончарная труба, выходящая из цистерны [14]. Расчищалась и цистерна на первом ярусе Дозорной башни. Для определения направления водопровода, питавшего баню, расположенную на посаде Сугдеи, в том же году Н.Д. Протасовым были впервые проведены разведочные шурфовки на примыкающей к городским стенам территории. Эти поиски водопровода увенчались успехом в следующем 1929 г. Судя по отчетным материалам, удалось установить, что именно этот водопровод подводил воду к бане Собрана. Мало того, была собрана небольшая коллекция разнообразных по морфологии водопроводных труб, хранящихся ныне в фондах ГИМ [8]. К сожалению, в отчетных материалах не удалось найти каких-либо упоминаний о направлении самого водопровода.

Исходя из накопленного объема информации, в 1931 г. археологическая экспедиция ГИМ под руководством Е.В. Веймарна детально обследовала источники на горе Перчем, зафиксировала несколько линий керамических водопроводов, отстойники и цистерны [9]. В том же году указанной археологической экспедицией был расчищен и центральный городской колодец, детально осмотренный еще в 1925 г. А.И. Полкановым [9].

С начала стационарных раскопок Судакской крепости в середине 1960-х гг. археологической экспедицией под руководством М.А. Фронджуло исследование городской системы водоснабжения активно продолжалось. В результате охранных раскопок на городском посаде были зафиксированы водопроводные каналы, системы отстойников. В частности, крупный городской магистральный водопровод обнаружен ученым в 1968 г. при обследовании трассы канализации современного пансионата “Крымская весна”. В следующем году было закончено изучение цистерны на первом ярусе Консульского замка [9]. В том же году исследователю удалось частично изучить водосборную галерею, расположенную к СЗ от портовой башни Ф. Астагвера. Ее изучение было продолжено и в ходе разведок М.А. Фронджуло в 1976 г. В 1969/1970 гг. раскопками М.А. Фронджуло был открыт средневековый фонтан, располагавшийся у восточной стены барбакана ниже башни Бернабо ди Франки ди Пагано. Во второй половине 1970–1980-х гг. И.А. Баранову удалось раскопать так называемую Малую городскую цистерну, несколько ниток магистрального водопровода — также на территории посада. Так, четыре ветки водопровода были зачищены в 1988 г. при проведении охранных работ на улице Истрашкина, 13. В 1990-е гг. В.В. Майко и А.В. Джанову посчастливилось доисследовать коптированный источник и в 1993 г. зафиксировать также на террито-

рии северного участка городского посада нитки водопровода византийского времени [9]. В это же время исследователями было установлено, что, например, в Солхате основной водоносный горизонт — террасовые нижнечетвертичные отложения [5, 6], в Сугдее же источником водоснабжения города служил избыток гравитационной влаги во влажные периоды и ее накопление в карстовых полостях известняка горы Перчем [4].

Со второй половины 1960-х гг. и до рубежа столетий активную работу по исследованию системы водоснабжения полуострова, в том числе в эпоху средневековья и нового времени, проводили известные крымские географы и гидрогеологи, сотрудники существовавшего тогда в Симферополе Института минеральных ресурсов Министерства геологии УССР А.И. Полканов и Ю.И. Шутов. Благодаря их усилиям на территории Судакской крепости был расчищен известный с конца XVIII в. колодец [11]. В сентябре 2015 г. работами по очистке колодца от камней и мусора руководил В.А. Захаров.

В 2014 г. в Институте географии была создана Крымская геоархеологическая экспедиция под руководством одного из авторов этой статьи. За 20 полевых сезонов в районе Судака удалось установить два водоносных слоя (верхне-юрский карбонатный и четвертичный террасовый) [3], а также дополнить и уточнить террасовую систему Н.И. Андрусова [1]. Обоснована новая система террас Судака, включающая в себя 12 морских террас четвертичного возраста [16, 17].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика исследований включает в себя современную археологическую фиксацию всех сохранившихся и выявленных в процессе археологических исследований остатков элементов и целостных звеньев средневековых систем водоснабжения. Помимо этого, важно сопоставить эти археологические данные с конкретными геологическими и географическими условиями.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Геология, геоморфология и источники водных ресурсов

Склоны горы Крепостной, на которой располагалась средневековая Сугдея, фактически абсолютно безводны. Ближайшие источники воды находятся в нескольких километрах к С от города на склонах горы Перчем. В геологическом строении окрестностей Судака выделяются две крупные формации: мезозойская (юрского периода) и четвертичная террасовая. Нижняя часть юрской формации (включая таврическую серию) пред-



Рис 1. Месторасположение изученных объектов водоснабжения средневековой Сугдеи. 1 – водосборная галерея; 2 – керамический водопровод по ул. Приморской; 3 – керамический водопровод по ул. Истрашкина; 4 – фонтан; 5 – керамический водопровод у Барбакана; 6 – фонтан барбакана; 7–9 – малая, большая и круглая цистерны; 10 – цистерна консульской башни; 11 – колодец.

ставлена плотными аргиллито-флишоидными глинистыми сланцами и вулканическими породами карадагской, копсельской и судакской свит. С точки зрения гидрогеологии, эта толща – водупор для двух вышележащих водосодержащих геологических формаций: верхнеюрской карбонатной и четвертичной террасовой [3].

Верхнеюрская карбонатная формация представлена закарстованными известняками мощностью несколько сотен метров, местами обильно водонасыщенными (судакская, манджилевская и ялтинская свиты) [3]. Они были основным источником водных ресурсов для Судака, так как их запасы весьма значительны и постоянно пополняются за счет атмосферных осадков над большей площадью горы Перчем, покрытую лесом, что в свою очередь обеспечивает защиту от загрязнения подземных вод. Кроме того, эти водоносные слои находятся на отметках 200–500 м абс., т. е. значительно выше средневекового города (50–110 м абс.), и это создает условия для строительства напорных водопроводов, по которым вода поступала в город самотеком.

Четвертичная террасовая формация представлена рыхлыми отложениями (галечники, пески, алевриты) и содержит также значительные водные ресурсы. Геоморфологически эти отложения образуют Судакский типовой террасовый профиль из 12 террас, прослеживаемых на южном и восточном склонах горы Перчем до высоты 200 м [15]. Мощность террасовых отложений в каждой террасе составляет 5–15 м, а суммарная мощность

этих отложений достигает 100–150 м. Это определяет значительно меньший объем водных ресурсов по сравнению с верхнеюрским водоносным слоем, а в современных условиях – также более низкое качество воды в связи с интенсивным внесением химических веществ для выращивания винограда на террасах.

Археологическая база для изучения водоснабжения средневековой Сугдеи

На сегодняшний день археологическая база состоит из отрывочных картографических сведений, данных письменных источников, археологических объектов и артефактов. Все картографические источники датируются только концом XVIII в. На плане г. Судака Петра Фишера (1771 и 1784 гг.) [9] показана примерная линия магистрального водопровода, идущего в направлении С–Ю с южного склона горы Перчем до фонтана, находящегося недалеко от центральных ворот Судакской крепости, а также указано местонахождение имеющихся в тот период фонтанов и двух колодцев на территории крепости. В качестве дополнения можно рассматривать архивные документы конца XVIII в., хранящиеся в Государственном архиве Республики Крым, позволяющие проследить ремонт старого и строительство нового керамического водопровода в Судакской крепости в период расквартирования там русского полка в конце XVIII – начале XIX в.

Основные источники для изучения средневековой системы водоснабжения Сугдеи–Солдайи –



Рис. 2. Общий вид Малой цистерны после окончания археологических раскопок И.А. Баранова.



Рис. 3. Общий вид Большой цистерны в начале XX в. до современной реставрации.



Рис. 4. Общий вид Круглой цистерны в конце 1980-х гг.

материалы археологических разведок и раскопок (рис. 1). Они позволяют говорить о следующих элементах средневековой системы водоснабжения: цистерны и водоемы, керамические водопроводы, колодцы, бани, фонтаны и др.

Цистерны и водоемы

Наиболее яркий пример отдельно стоящих цистерн для воды – сооруженные в средневековой Солдаи-Судака и дошедшие до наших дней: так называемые Малая, Большая и Круглая. Малая и Большая цистерны построены в первоначальный период генуэзского владычества в третьей четверти XIV в. Малая цистерна размерами 4.93×11.19 м при глубине 4.42 м была перекрыта коробовым сводом с черепичным покрытием и вмещала ≥ 150 м³ воды (рис. 2). Ввод воды осуществлялся по двум линиям труб, подходящих с З и Ю. Среди гончарных труб, подходящих с Ю, найдена медная труба. Западный трубопровод расположен выше южного, на том же уровне раскопан фрагмент водопровода, направленный в сторону Большой цистерны. В северо-восточном углу цистерны под полом проложена труба для слива воды и чистки цистерны.

Размеры Большой цистерны составляют 12.56×9.9 м при высоте от дна до пяты свода 8.85 м (рис. 3). Эта цистерна, вмещающая ≥ 350 м³ воды, имеет два отсека, соединенных двумя арочными проемами. В южной стене вмонтирована гончарная труба.

Круглая цистерна диаметром ~ 4.75 м и глубиной 2.45 м выдолблена в скальном грунте (рис. 4). На уровне 2 м от пола она была перекрыта каменным куполом, который находился под землей и начинался уже на уровне 1 м от пола цистерны. На поверхности же располагался только узкий проход с проемом для дверей, за которым находились каменные ступени, ведущие к полу цистерны. Пол был вымощен каменными плитами, сложенными на известковом растворе. На уровне 2 м от пола в купол была вмонтирована керамическая труба. Цистерна вмещала ≥ 100 м³ воды.

Помимо этого, в генуэзское время функции цистерн выполняли первые ярусы наиболее значимых и защищенных крепостных башен, чаще всего консульских. Для Солдаи наиболее известна цистерна, которая была первым ярусом Консульской башни (рис. 5). Подача воды в цистерну осуществлялась через западную стену по вмонтированной в нее гончарной трубе. Внешняя труба была специально выведена в каменную ванну и подходила к цистерне. Цистерна занимала половину нижнего яруса Консульской башни и была перекрыта коробовым сводом. Пол был вымощен известняковыми плитами с пазами,



Рис. 5. Общий вид цистерны Консульского замка в процессе расчисток М.А. Фронджуло.

скрепленными качественным гидроизолирующим раствором. Сами плиты были уложены на известковую подушку, располагавшуюся на скальном выступе, что обеспечивало дополнительную герметичность сооружению.

Аналогичная цистерна для воды в виде изолированного помещения неправильной четырехугольной формы располагалась и на первом ярусе Дозорной башни, в юго-западной ее части. Эта цистерна, как и предыдущая, была перекрыта коробовым сводом с подпружной аркой. Пол помещения был перекрыт тщательно подогнанными известняковыми плитами на известковом растворе, полностью аналогичными вымостке цистерны на первом ярусе Консульской башни. Не исключено, что на первом этапе цистерны для воды и только позднее использовался как часовня. Вход в цистерну осуществлялся со второго этажа [9].

Аналогичные функции цистерны для сбора воды выполнял нижний ярус Консульской башни и башни № 6 генуэзской крепости Чембало (Балклава). При этом цистерна в башне № 6 была перекрыта двухарочным сводом, внутренние плоскости стен оштукатурены, но пол, в отличие от пола Солдайских цистерн, был покрыт только раствором и тонким слоем гидрофобной зеленой глины [15].

Керамические водопроводы

В Сугдее археологическими раскопками и разведками зафиксировано 6 линий гончарного водопровода [9]. Водопровод 1 расположен вблизи монастыря с двухабсидным храмом на южном склоне горы Перчем. Вероятно, данное гидротехническое сооружение, следы трассы которого и

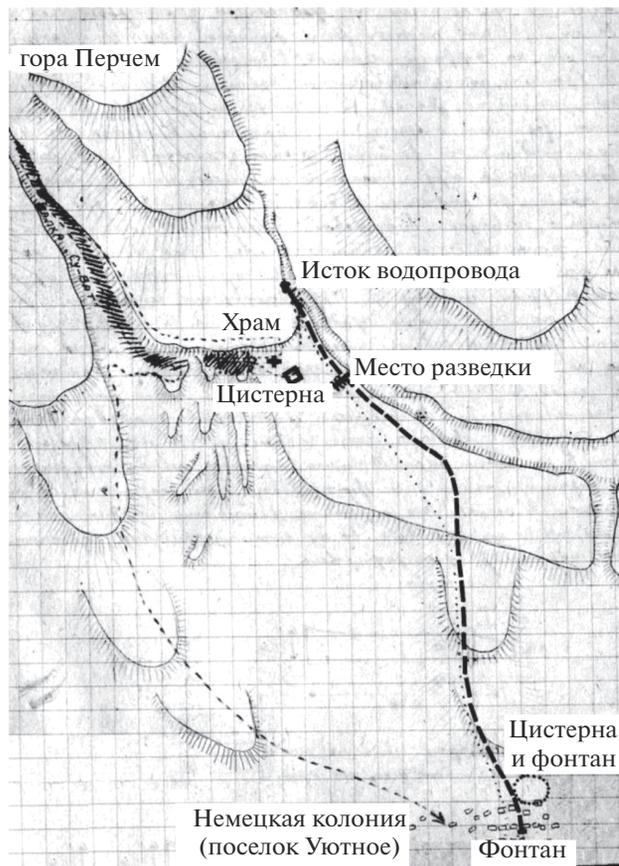


Рис. 6. Схема направления магистрального средневекового водопровода Сугдее, исследованного в 1931 г. Е.В. Веймарном.

сейчас еще просматриваются на местности, было одним из главных магистральных городских водопроводов. По результатам сохранившихся схематических чертежей 1931 г. (рис. 6) [9], раскопок и визуальных археологических разведок 1993 г. ясно, что шел он от кооптированного источника на горе Перчем, располагавшегося выше двухабсидного храма. Ниже храма у подножия южного отрога горы Перчем разведками в 1931 г. была найдена цистерна, месторасположение которой установить пока не удалось. Водопровод проходил по склону сохранившейся до сих пор балки и подходил к цистерне и фонтану на ул. Приморской. Цистерна возле и ныне существующего фонтана в виде небольшого водоема сохранялась до конца 1950-х гг.

От магистрального водопровода 2 в 1968 г. зафиксировано не менее шести ниток. Четыре из них сосредоточено в районе главных крепостных ворот. Водопровод 3 прослежен у средневековой бани (ул. Приморская, 44). У водопровода 4 одна ветка прослежена в районе клуба санатория "Сокол", вторая обнаружена в 1964 г. за пределами городища в районе горы Полвани-Оба, ограни-

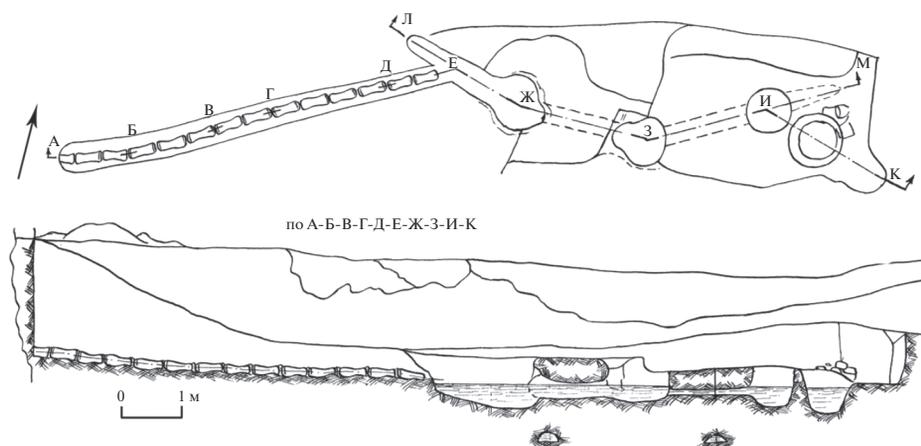


Рис. 7. План и разрез по линии А–К водопровода с отстойниками для воды у горы Полвани-Оба (раскопки М.А. Фронджуло).

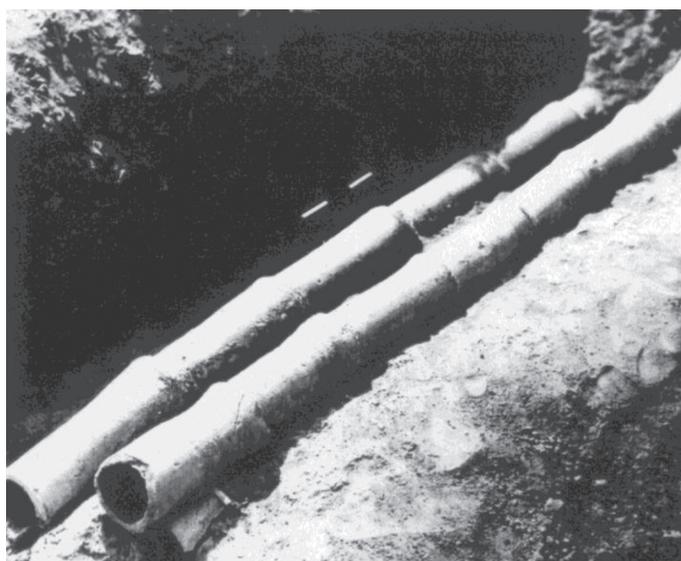


Рис. 8. Керамические секции магистрального водопровода по ул. Истрашкина в г. Судак (раскопки И.А. Баранова).

чивающей портовую часть средневекового города с 3. На этом участке прослежено несколько водозаборных колодцев, вода в которые поступала по водопроводу. Все они, выполнявшие роль отстойников, были вырыты в материковом мергеле и представляли собой неглубокие (до 1.5 м) ямы цилиндрической формы (рис. 7). Четыре ветки водопровода 5, обнаруженные И.А. Барановым по улице Истрашкина, 13, вероятно – окончание магистрального городского водопровода 1 (рис. 8). Водопровод 6 в 1993 г. представлял собой канал, вырытый в материковой глине и обложенный со всех сторон каменными плитками на цементном растворе, перекрытыми аналогичными

плитами на цемянке (рис. 9). Датируется, возможно, ранневизантийским временем.

Наличие зафиксированных фрагментов и археологически целых гончарных водопроводных труб позволяет предполагать, что по крайней мере во второй половине XIV–XV в. в городе существовали три основных размерных стандарта этих изделий. Длина секций магистральных водопроводов, подводивших воду к основным цистернам, составляла от 53.5 до 56.5 см, наибольший диаметр – 16.2 см, диаметр стыковочного узла – 11.0 см. Водопроводы, подводившие воду к баням, были меньшими. В большинстве случаев длина одной секции составляла от 44.5 до 46.5 см, наибольший



Рис. 9. Общий вид водопровода у подножия горы Перчем в ходе разведок 1993 г.

диаметр 11.2 см, диаметр стыковочного узла 7.0 см. Существовали локальные водопроводы и меньшего диаметра с длиной секции всего 37 см.

К сожалению, практически все нитки керамических водопроводов обнаружены в ходе либо археологических разведок, либо охранных раскопок. Их все еще недостаточно опубликовано, и они требуют дальнейшего изучения. Значительно помогают в этом аналогичные сооружения, известные на территории средневековой Таврики. Так, например, при раскопках бани Солхата в 2011 г. было обнаружено, что ложе канала водопровода, помимо известковой заливки, было выложено тонкими плитками сланца, поверх которых располагались фрагменты керамических труб большого диаметра. Последние служили непосредственно для установки гончарных водопроводных труб. Помимо этого, канал водопровода по бокам был выложен небольшими сланцевыми камнями и плитками [2]. Керамический водопровод, подававший воду к монастырскому комплексу у горы Килиса-Кая, был положен на слой известки между двумя тщательно подогнанными однопанцирными каменными кладками, перекрытыми, вероятно, каменными плитами [7]. Водопровод, входивший в цистерну башни № 6 крепости Чембало, был уложен на подстилку из качественного глинисто-известкового раствора, находившуюся непосредственно в скальной поверхности [15].

Для пополнения запасов воды администрацией средневековой Сугдеи использовались не только возможности источников пресной воды на горе Перчем. Важную роль в накоплении дождей и сточных вод играли и другие гидротехнические сооружения. В этом плане большое значе-

ние имеет упоминавшееся сооружение, расположенное к СЗ от портовой башни Ф. Астагвера (рис. 10), представлявшее собой канал шириной ~80 см и глубиной ~70 см, вырытый в материковом мергеле [9]. Края канала были укреплены вертикально поставленными плитами песчаника, перекрытыми тщательно подогнанными друг к другу без применения раствора такими же плитами. Важно подчеркнуть, что на северо-восточном отрезке этого канала был зафиксирован участок, где данная водосборная галерея переходила в гончарный водопровод. Вода из последнего поступала в отстойник фонтана, вырубленный в материковом мергеле и укрепленный кладкой на известковом растворе. Из отстойника вода поступала по трубе в фонтан, украшенный циркульной аркой. К фонтану с С вела лестница из трех ступеней, вырубленных в материковом мергеле и покрытых песчаниковыми плитами. К сожалению, материалы раскопок М.А. Фронджуло этой водосборной галереи в 1969 г. до сих пор в полном объеме не опубликованы.

Вероятнее всего, данное сооружение можно рассматривать как своеобразный вариант Судакских кяризов, хорошо известных в Солхате [6] и Евпатории. Плиты его перекрытия располагались на глубине ≤ 1.5 м от уровня современной дневной поверхности. Крайне незначительна была глубина самого сооружения. К сожалению, археологическими исследованиями был открыт только небольшой его участок, больше напоминающий противоливневый водовод. Последние, хорошо известные еще с византийского времени, также зафиксированы и в Солхате [6].



Рис. 10. Общий вид Сугдейской водосборной галереи у башни Фредерико Астагуэрро.

Колодцы

Наиболее изученный на территории средневековой Сугдеи колодец — сооружение, расположенное в центральной части средневекового города ниже храма на консолях. Оно представляло собой небольшую цистерну бутылкообразной формы, вода в которую поступала по глиняному водопроводу. Глубина ствола колодца составляла 4 м. Дно колодца специально вырезано в материковой породе — мергеле. Стенки сложены из плит песчаника на известковом растворе. Изначально сруб имел шестигранную форму и только впоследствии приобрел полукруглые очертания. В Крыму наиболее изученные средневековые колодцы — разные по принципам наполнения водой — Чуфут-Кале, Мангупа, и Эски-Кермена [10].

Бани

Сложнейшими общественными сооружениями средневекового города были две бани, расположенные на посаде средневекового города и имевшие, вероятно, собственное автономное водоснабжение по керамическому водопроводу. Обе судакские бани, расположенные одна возле другой в западной части посада у ручья, текущего от источника на горе Перчем, открыты при раскопках М.А. Фронджуло и одного из авторов этой статьи [9].

Фонтаны

Благодаря археологическим исследованиям на сегодняшний день известно о двух средневековых городских фонтанах. Первый располагался в центре пос. Уютного на территории ул. Истрашкина, 13. Он представлял собой каменную стену с циркулярной кладкой из песчаника на известковом растворе. С задней стороны находился каменный отстойник, перекрытый коробовым сводом. Перед фонтаном в 1950-е гг. находился небольшой водоем, отмеченный на схеме 1931 г., вероятно, в средневековое время служивший для водопоя скота [9]. Второй фонтан располагался у восточной стены барбакана ниже башни Бернабо ди Франки ди Пагано.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе анализа археологических данных и письменных источников установлено, что население средневековой Сугдеи на протяжении XIV–XV вв. практически всегда было полностью обеспечено водными ресурсами, даже в условиях длительной осады. При этом необходимо учитывать, что общая численность городского населения была больше, чем современная в г. Судак.

Выявлены основные источники пресной воды, сосредоточенные в двух водоносных слоях — верхне-юрских карстовых карбонатных отложениях и рыхлых осадках четвертичных террас. При этом водоупором для обеих водоносных формаций служили нижнеюрские глинистые сланцы.

Дополнительными источниками были атмосферные осадки и конденсационные воды.

Описаны основные составляющие системы водоснабжения средневековой Сугдеи. Они представлены цистернами, колодцами, галереями для воды, фонтанами и банями. При этом главный запас воды для городского населения хранился в специально сооруженных цистернах, на первых ярусах башен цистерны предназначались для автономного снабжения водой городской администрации и генуэзского гарнизона.

Реконструированы, главным образом по материалам раскопок, пути и трассы водопроводов с южных склонов горы Перчем до средневекового города. Основная трасса водовода (водопровод 1), обследованная в ходе археологических раскопок в 1993 г. и визуальных исследований в 2021 г., проходила по склону балки от водоема у монастыря XIV–XV вв. на горе Перчем до крепостных стен.

Выявлены основные технологические приемы строительства, эксплуатации и ремонта трубопроводов силами местных мастеров с использованием имеющихся и импортных керамических труб и материалов.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Приведены примеры наиболее эффективного использования опыта средневековых мастеров при современном водоснабжении г. Судака. Самыми ценными являются обнаруженные ими источники воды из верхнеюрского водоносного слоя на горе Перчем. Вполне возможно также использование сейчас средневековых трасс напорных водоводов. А если при этом воспользоваться современными материалами (вместо керамических труб – полиэтиленовые), то за счет местных водных ресурсов можно полностью обеспечить население Судака, включая и многочисленных отдыхающих в летний период, местной водой на основе замкнутого водопотребления.

Для рационального использования водных ресурсов можно также рекомендовать раздельное водопотребление: для питьевой воды использовать источники из верхнеюрского водоносного горизонта, а для технических целей – воду из четвертичных террасовых отложений и атмосферные осадки в крепости и водосборном бассейне р. Судака.

Использование средневековой системы водоснабжения для решения современных проблем водоснабжения г. Судака не кажется авторам статьи фантастичным. Следует отметить, что в 1993 г. обсуждалась проблема восстановления элементов водоснабжения средневекового Солхата (современный г. Старый Крым Кировского района Республики Крым). На основе проведенных ар-

хеологических и геологических исследований был составлен проект [6]. Тяжелое экономическое положение Украины того времени не позволило его реализовать. Есть надежда, что при современном активном развитии полуострова, которое невозможно без решения вопроса его водоснабжения, Сугдее повезет больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрусов Н.И. Террасы окрестностей Судака // Записки Киевского общества естествоиспытателей. 1912. Т. 22. Вып. 2. 88 с.
2. Гаврилов А.В., Майко В.В. Средневековое городище Солхат-Крым (материалы к археологической карте города Старый Крым). Симферополь, 2014. 212 с.
3. Геология шельфа УССР. Стратиграфия (шельф и побережье Черного моря) / Под ред. Тесленко Ю.В., Шнюков Е.Ф. Киев: Наук. думка, 1984. 183 с.
4. Ковалева Н.О., Ковалев И.В., Столпникова Е.М. Оригинальные технологии водоснабжения средневековых городов в Крыму // История и современность. 2015. № 1. С. 142–155.
5. Ковалева Н.О., Столпникова Е.М., Ковалев И.В. Загадка водоснабжения средневековых городов Крыма // Социоестественная история. Вып. XXX–VIII. Природа и общество в эпоху перемен. М., 2014. С. 79–86.
6. Крамаровский М.Г. Водоснабжение в средневековом Солхате // Свод памятников истории, архитектуры и культуры крымских татар. Т. IV. г. Старый Крым. Казань; Симферополь, 2020. С. 112–120.
7. Лавров В.В. Разведки близ храма у подножия горы Килиса-Кая в 2019 году // История и археология Крыма. Т. XIII. Симферополь, 2020. С. 201–206.
8. Майко В.В. Неизвестные страницы археологического изучения средневековой Сугдеи в 1925–1931 гг. // Неизвестные страницы археологии Крыма: от неандертальцев до генуэзцев. СПб.: Нестор-История, 2017. С. 232–271.
9. Майко В.В., Джанов А.В. Археологические памятники Судакского региона Республики Крым. Симферополь, 2015. 448 с.
10. Полканов Ю.А., Шутлов Ю.И. Водоснабжение древней крепости Джуфт-Кале // Причерноморье, Крым, Русь в истории и культуре. Киев; Судак, 2004. С. 158–163.
11. Полканов Ю.А., Шутлов Ю.И. Колодцы Мангуп-Кале и Судакской крепости // Причерноморье, Крым, Русь в истории и культуре. Киев; Судак, 2004. С. 152–157.
12. Репников Н.И. Разведки древнего водопровода в Эски-Кермене в 1931 г. // Сообщения Государственной Академии истории материальной культуры. 1931. № 11–12. С. 62–65.
13. Репников Н.И., Шмит Ф.И. О технике водоснабжения средневековых городов Крыма // Сообщения

- Государственной академии материальной культуры. Л., 1932. № 9–10. С. 46–50.
14. *Скржинская Е. Ч.* Судакская крепость. История – археология – эпиграфика. Киев; Судак; Санкт-Петербург, 2006. 380 с.
15. *Столяренко Е. Н.* Новый участок водопровода генуэзской крепости Чембало (XIV–XV вв.) // Древности, 2011. Харьковский историко-археологический ежегодник. Харьков, 2011. С. 353–359.
16. *Чепалыга А. Л.* Новая концепция Черноморских террас Юго-Восточного Крыма // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. М., 2015. № 74. С. 90–104.
17. *Чепалыга А. Л., Костовска Сил. К., Костовска Ст. К., Адаева Д. О., Семеняк Н. С., Добрянский А. С., Чернов Р. А.* Судакский типовый профиль Черноморских террас как палеоархив территории за последние 2 млн лет // Русь–Европа–Причерноморье–Византия. Сб. науч. статей и докл. Симферополь, 2021. С. 187–194.