

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Х. Дегтерев

**ЗАПОЛНЯЕМОСТЬ
ВОДОХРАНИЛИЩ КРЫМА
В ПЕРИОД ПЕРЕКРЫТИЯ
СЕВЕРО-КРЫМСКОГО КАНАЛА**

Монография

Севастополь
СевГУ
2022

УДК 556(470-924.71)
ББК 26.222(235.7)
Д26

Р е ц е н з е н т:
Г.В. Кучерик – канд. техн. наук

Дегтерев, А. Х.
Д26 **Заполняемость водохранилищ Крыма в период перекрытия Северо-Крымского канала : монография / А.Х. Дегтерев ; Министерство науки и высшего образования РФ, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». – Севастополь : СевГУ, 2022. – 70 с. – Текст : электронный.**

ISBN 978-5-6048340-7-7

Рассмотрен режим заполняемости водохранилищ Крымского полуострова за счет поверхностного стока в 2014 – 2021 гг. Анализируется водный баланс Крыма и влияние изменения климата на сезонную и межгодовую изменчивость его составляющих. Использовались данные о расходах рек, среднемесячных температурах и суммах осадков, радиационном балансе, а также данные по изменению уровня воды в водохранилищах в разных районах Крыма в течение года. В приложении приведены графики сезонного изменения наполняемости водохранилищ в отдельные годы. Приведена теоретико-игровая модель трансграничного водопользования.

Для специалистов в области водопользования и гидрометеорологии, студентов и аспирантов.

УДК 556(470-924.71)
ББК 26.222(235.7)

Утверждена на заседании кафедры «Радиозэкология и экологическая безопасность», протокол № 5 от 30 декабря 2021 г.

ISBN 978-5-6048340-7-7



© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ВОДОХРАНИЛИЩА И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ КРЫМА	7
1.1. Реки Крыма	7
1.2. Водохранилища естественного стока	12
1.3. Наливные водохранилища	17
Глава 2. РЕЖИМЫ ЗАПОЛНЯЕМОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ	22
2.1. Чернореченское водохранилище	22
2.2. Симферопольское водохранилище	26
2.3. Водохранилища Южного Берега Крыма	28
2.4. Скважины и иные альтернативные источники водоснабжения	30
Глава 3. ПРОЯВЛЕНИЕ ГОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ В КРЫМУ	33
3.1. Влияние изменения климата на заполнение водохранилищ	33
3.2. Изменение температуры воздуха и воды	39
3.3. Изменение количества осадков	45
3.4. Радиационный баланс и испаряемость	52
3.2. Модели испарения	55
Глава 4. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАНСГРАНИЧНОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОСТОЧНОМ СРЕДИЗЕМ-НОМОРЬЕ	59
4.1. Ограничение стока реки Евфрат	59
4.2. Теоретико-игровые модели взаимодействия двух сторон при строительстве дамб	61
4.3. Игра «Перекрытие стока»	63
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	65
ЛИТЕРАТУРА	67
ПРИЛОЖЕНИЕ	68

ВВЕДЕНИЕ

Водохранилища в Крыму и в Севастополе в настоящее время являются основными источниками водоснабжения. Даже в период действия Северо-Крымского канала, обеспечивавшего поставки основных объемов воды на полуостров из Каховского водохранилища, они играли важную роль, о чем свидетельствует создание в те годы целой системы крупных наливных водохранилищ. После перекрытия канала значение водохранилищ только увеличилось, хотя часть наливных водохранилищ и была законсервирована. В то же время в этот период (с 2014 по 2022 гг.) резко возросла роль поверхностного водостока и подземных вод в наполнении водохранилищ Крыма. Так что перекрытие канала было в известном смысле своего рода экспериментом, позволяющим сравнить разные режимы наполняемости водохранилищ в последние десятилетия.

Пропускная способность Северо-Крымского канала достигает $2,5 \text{ км}^3/\text{год}$. Причем после восстановления подачи воды по каналу она даже несколько снизится за счет замены устаревшего насосного оборудования 1971 г. на более экономичное современное. Следует также отметить, что реально вода через канал прокачивалась только в теплый период, обычно с апреля по октябрь, когда заполнялись специально построенные наливные водохранилища. Помимо значительного расхода воды на орошение в вегетационный период это связано и с эксплуатацией оборудования гидроузлов в безморозный период.

В 2013 г. через Северо-Крымский канал поступило $1,35 \text{ км}^3$ воды. И это тогда составило 87 % полного водозабора в Крыму. Причем больше половины поступившей по каналу воды были потеряны при транспортировке из-за фильтрации и испарения. Это связано с его грандиозными размерами, длина канала превышает 400 км, из которых 100 км проходят по территории Херсонской области Украины.

На водозабор из местных рек тогда пришлось менее 9 %, на воду из скважин – меньше 5 %. Интересно, что 77 % полученной Крымом воды было в 2013 г. израсходовано на нужды сельского хозяйства, включая выращивание риса. На нужды жилищно-коммунального комплекса тогда пришлось лишь 16 % воды, 7 % израсходовано промышленностью.

После перекрытия канала уже в следующем, 2014 году, приходная часть водного баланса Крыма уменьшилась сразу в 5 раз, до $0,31 \text{ км}^3$, что примерно соответствует суммарному стоку всех рек Крыма. Потребление воды в сельском хозяйстве сразу уменьшилось в 10 раз, были введены ограничения на потребление воды в жилищно-коммунальном секторе. Зато потери воды при транспортировке сразу уменьшились до 5 %. В 2015 г. водозабор был еще меньше, всего $0,25 \text{ км}^3$. Отчасти это было связано с большим количеством осадков в данном году, что уменьшило потребности в орошении. При этом на водозабор из поверхностного стока приходилось уже 55 %, а на воду из скважин – 37 %. В последующие годы доля подземных вод из скважин в водозаборе продолжала увеличиваться, были пробурены сотни новых скважин. В том

числе, было проведено разведочное бурение на дне Азовского моря. К 2024 г. ставилась задача удвоить суммарный водозабор в Крыму за счет бурения новых скважин.

Принятые меры, включая строительство новых водозаборов как на реках (Бельбекский водозабор), так и за счет скважин (Бештерек-Зуйский водзабор) пока не позволили окончательно решить проблему обеспечения жителей и гостей Крыма чистой водой. По состоянию на 2020 г. нехватка воды сильно сказывалась в основных городах Крыма летом и осенью. Так, в Симферополе, Бахчисарае, Ялте вводилась подача воды по графику, в течение 4-6 часов в сутки. В сельской местности проблема нередко решалась путем доставки воды в автоцистернах. Контролировать качество воды при этом достаточно сложно, было много жалоб от населения. В плане питьевой воды многие стали переходить на потребление бутилированной воды, оно растет на десятки процентов в год.

Перекрытие канала в 2014–2022 гг. обострило проблему зависимости водоснабжения от погодных аномалий. Если раньше в засушливый год достаточно было просто увеличить прокачку воды через Северо-Крымский канал в нужный период времени, то теперь, по сути, приходилось «ждать милости от природы», как писал Мичурин. Кроме того, в течение каждого года в туристический сезон потребление воды кратно возрастает, что требует иметь определенные запасы воды в водохранилищах. А ведь туристический поток в эти годы заметно увеличивался после строительства Крымского моста.

Необходимость использования водохранилищ в Крыму связана, с одной стороны, с очевидной нехваткой естественных водных ресурсов при существующем уровне хозяйственной активности здесь, а с другой – со значительной сезонной и межгодовой изменчивостью основных составляющих водного баланса. Так, годовой расход реки Бельбек, являющейся самой полноводной рекой Крыма, составляет в среднем $2,7 \text{ м}^3/\text{год}$, однако до 80 % этого стока приходится на короткий период весеннего паводка, когда расход реки достигает $200 \text{ м}^3/\text{с}$. И наоборот, в засушливые годы объем стока значительно уменьшается, вплоть до полного исчезновения наземного течения на отдельных участках русла. Именно таким был, например, 2020 г., когда по состоянию на 1 июля запасы воды в водохранилищах были в 2,2 раза меньше, чем в 2019 г.

За последние десятилетия режим заполнения водохранилищ Крыма существенно изменился, частично изменились и источники пополнения воды. Проектируются два новых водохранилища – Солнечногорское под Алуштой объемом 8 млн м^3 и в Лозовом под Симферополем объемом 15 млн м^3 . Наряду с этим на полуострове в последние годы усилились засушливые явления, связанные с глобальным потеплением климата. Повышение среднегодовой температуры на 2°C , уменьшение количества осадков и увеличение средней скорости ветра, что ведет к усилению испарения с водного зеркала водохранилищ, отрицательно сказываются на уровне воды в водохранилищах.

Следует отметить, что эксплуатация действующих водохранилищ и строительство новых осложняется карстовыми и сейсмическими явлениями в предгорных и горных районах Крыма. При этом все основные реки Крыма берут начало в Горном Крыму, а их питание связано с повышенным количеством осадков здесь (оно втрое больше, чем в степном Крыму), а также с таянием накопленного за зиму снега в период паводка.

Все это требует изучения современного режима заполнения водохранилищ поверхностного стока и расходования их водных запасов в течение года. Большое значение имеет также анализ потерь воды из водохранилищ на испарение и фильтрацию, которые по некоторым оценкам вполне сравнимы с расходами воды на водоснабжение. Решению этих актуальных вопросов и посвящена данная монография.

Глава 1

ВОДОХРАНИЛИЩА И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ КРЫМА

1.1. Реки Крыма

Полуостров Крым расположен на юге-западе европейской части Российской Федерации между $44^{\circ}23'$ и $46^{\circ}13'$ с. ш. Несмотря на то, что он омывается Черным и Азовским морями, его водные ресурсы невелики. Это связано с небольшой площадью соответствующего водосборного бассейна, которая совпадает с площадью полуострова и составляет 27 тыс. км², из которых 72 % – равнина, 20 % – горы и только 8 % составляют озёра и другие водные объекты. В этом смысле Крым близок к таким крупным островам Средиземного моря, как Сардиния или Кипр.

По данным государственного водного реестра только на территории Республики Крым имеется 1657 рек, более 300 озёр, 1842 пруда и 23 водохранилища. При этом гидрографическая сеть Крымского полуострова неравномерно распределена. Горная часть Крыма, которая является областью питания большинства рек полуострова, имеет развитую речную сеть, тогда как в равнинной части речная сеть встречается редко, многие речные потоки заполняются водой только в половодье. В верхнем течении в связи со значительным уклоном реки Крыма прорезают глубокие русла в горах, создавая каньоны. Крутые русла рек, впадающие в море на южном берегу Крыма, нередко прерываются водопадами, одним из которых является водопад Учан-су высотой 98 м в окрестностях Ялты. Среднегодовой речной сток не превышает 1 км³/год. В разные годы он составляет от 0,3 км³/год до 1,3 км³/год. Так, максимальный сток наблюдался в 2015 г., тогда он на 30 % превышал среднегодовой. Основными реками Крыма и Севастополя являются Бельбек, Салгир, Альма, Кача, Черная. Кроме них много совсем небольших рек и ручьёв по всей территории полуострова. Основные водные артерии Крыма представлены на рис. 1.1, параметры рек приведены в табл. 1.1, включая площадь их водосборного бассейна. Сюда помимо рек с площадью водосборного бассейна свыше 50 км², как это обычно принято в гидрологии суши, включены и реки с меньшей площадью бассейна. Как видно из табл. 1.1, их сток, тем не менее, превышает сток некоторых «настоящих» рек.

Кроме рек на рис. 1.1 показаны также озера и основные ответвления Северо-Крымского канала (Азовский канал, Соединительный канал, Черноморский канал, Сакский канал, Красногвардейский канал и другие). Эти каналы частично и сейчас используются, как правило, в реверсном режиме – для снабжения водой северного Крыма из водохранилищ естественного стока в предгорных районах.



Рис. 1.1. Основные водные объекты Крыма

Таблица 1.1

Основные параметры рек Крыма

Река	Длина, км	Площадь бассейна, км ²	Средне- годовой расход, м ³ /с	Макси- мальный расход, м ³ /с	Объём стока, млн м ³	Пункты, где производились замеры
Западный Булганак	52	180	0,047	9,42	1,5	с. Камышинка
Альма	84	635	1,21	114	38,3	с. Вилино
Кача	69	573	1,69	153	53	с. Айвовое
Бельбек	63	505	2,75	129	66,1	с. Фруктовое
Черная	35	436	1,94	160	75,3	с. Чернореченское
Учан-Су	8,4	38	0,34	60	11,2	г. Ялта
Дерекойка	12	44,3	0,51	41,3	18,2	г. Ялта
Улу-Узень	15	60,8	0,47	32,2	17,7	г. Алушта
Демерджи	14	58,2	0,22	42,2	8,5	г. Алушта
Восточный Улу-Узень	16	29	0,32	20,3	10,7	с. Солнечно- горское
Салгир	204	4010	1,8	19,4	55	г. Симферополь
Мокрый Индол	27	121	0,2	20	6,7	с. Тополёвка
Чорох-Су	33	148	0,12	5,53	3,7	с. Изюмовка

Салгир является самой длинной рекой на полуострове. Эта река образуется при слиянии рек Ангары и Кызылкобинки (Кизил-Коба), на северо-западных склонах Крымских гор в непосредственной близости от гряды Чатыр-Даг, в 15 км к юго-востоку от Симферополя, у с. Заречное. Протекает на северо-западе через зону предгорья, при выходе на равнину поворачивается на северо-восток, проходит практически по всей территории Крымского полуострова, впадает в залив Сиваш Азовского моря. Его основные притоки: Бештерек, Зуя, Бурулча, Биюк-Карасу. Бассейн асимметричный, основной вклад дает правый берег. Плотность речной сети варьируется в пределах бассейна от $0,7 \text{ км/км}^2$ в верховьях до $0,1 - 0,2 \text{ км/км}^2$ в средней части, а в нижнем течении (район Присивашья) уменьшается до $0,05 \text{ км/км}^2$.

Длина русла реки составляет 232 км вместе с притоком Биюк-Карасу, таким образом Салгир образует в регионе самую большую речную систему. В нее входит 14 притоков общей протяженностью 923 км. Источник питания реки смешанный, с преобладанием снежного. Наибольший расход приходится на период с конца февраля по май, что связано с таянием снега и дождями. Причем зимой и весной часто наблюдаются паводки, а летом - только эпизодически.

Среднегодовое количество воды выше г. Симферополя в 195 км от устья реки составляет $0,96 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует стоку $0,03 \text{ км}^3/\text{год}$. В нижнем течении (в 36 км от устья у с. Двуречье) расход $1,20 \text{ м}^3/\text{с}$ (объем стока $0,04 \text{ км}^3/\text{год}$). При этом средний из максимальных расходов воды выше Симферополя достигает $29,0 \text{ м}^3/\text{с}$, а в нижнем течении - только $9,7 \text{ м}^3/\text{с}$. Средний из минимальных расходов воды выше Симферополя равен $0,07 \text{ м}^3/\text{с}$, а вблизи устья - $0,35 \text{ м}^3/\text{с}$. Абсолютные максимумы и минимумы расхода Салгира выше Симферополя составляют 116 и $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно, то есть отличаются в тысячи раз [2].

Река Альма берет начало на северном склоне Бабуган-Яйлы от слияния реки Бабуганки и ручья Сары-Су. Она впадает в Каламитский залив Чёрного моря. Длина реки 87 км, площадь водосборного бассейна 635 км^2 . Ее основные правые притоки - Коса, Мавля и Сабла, левые - Бодрак, Савлух-Су, Карасу, Аранча, Пискур, Большой Ускулар, Сухая Альма, Елга, Эски-Кышав [3].

Среднегодовое количество воды Альмы $1,2 \text{ м}^3/\text{с}$, таким образом ее сток не уступает стоку Салгира, хотя площадь бассейна почти на порядок меньше. На Альме построено два водохранилища: Партизанское, объемом 34 млн. м^3 , построенное в 1966 г. для водоснабжения Симферополя, и Альминское, объемом 6,2 млн. м^3 , построенное на боковой балке Базар-Джилга еще в 1934 г. для орошения [6].

Три реки протекают по территории Севастополя, города федерального значения (рис. 1.2). Это река Черная (протяженностью 35 км), река Бельбек (протяженностью 63 км) и река Кача (протяженностью 69 км). Они заметно уступают Альме по длине и по площади водосборного бассейна, но превосходят ее по расходу. Так Бельбек - это самая полноводная река Крыма, только у нее среднегодовое количество воды превышает $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$. У остальных рек

Крыма он менее $2 \text{ м}^3/\text{с}$. В свою очередь, на реке Черная построено самое большое в Крыму Чернореченское водохранилище объемом 64 млн. м^3 . Да и сама Севастопольская бухта – это по сути продолжение русла реки Черная (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Основные реки на территории города Севастополя

Река Черная относится к группе рек на северо-западном склоне Главного хребта Крымских гор. Верхняя часть бассейна реки расположена на западных склонах горного хребта и имеет расчлененный рельеф. Водосборные бассейны такого рода рек имеют удлинённую вдоль реки форму, расширенную в верхней части, которая является основной для питания реки. Именно здесь находятся и ее основные притоки, в среднем и нижнем течении притоки практически отсутствуют. Всего у р.Черная 11 притоков: р. Узунджа, р. Боса, р. Бага Нижняя, р. Бага Верхняя, р. Уркуста, р. Ай-Тодорка, р. Сухая речка, р. Байдарка, р. Уппа, р. Арманка, р. Календа [4]. Сама же река начинается у села Родниковое из Скульского источника, который дает основную часть стока реки. Длина реки составляет 41 км, площадь водного бассейн 436 км^2 . В верхнем течении уклон русла реки весьма значителен (70 м/км), но после ее выхода в Байдарскую долину резко уменьшается. Во время маловодного периода ближе к устью реки наблюдается ее пересыхание.

Река Черная относится к рекам паводкового типа. Во время паводка уровень воды в реке поднимается примерно на 2–3 м. Даже в меженный период расходы реки при экстремальных паводках могут увеличиваться на порядок и более. Питание реки смешанное – атмосферное и подземное. Атмосферное питание реки является преобладающим, оно происходит как за счет дождей, так

и за счет таяния снега. При анализе среднего многолетнего гидрографа стока выделяется два периода: многоводный период (с декабря по апрель включительно), когда проходит 51,2 % от годового стока, и маловодный период, то есть межень (с мая по ноябрь).

Летняя межень может прерываться интенсивными кратковременными паводками. Максимальные расходы воды в теплый период составляют от 120 м³/с (объем стока 24,7 млн м³) до 200 м³/с в холодный период года (объем стока 37 млн м³). Минимальные расходы на реке Черной наблюдаются в летние и осенние месяцы (в августе – сентябре) в связи с уменьшением или даже отсутствием атмосферных осадков и истощением подземного стока.

Река Бельбек – самая полноводная из рек Крыма. Река расположена на юго-западе Крыма. Длина реки – 63 км, площадь водосборного бассейна – 505 км², уклон реки 6 м/км. Река Бельбек образуется при слиянии рек Озенбаш (Биюк-Узенбаш) и Манаготра, стекающих с северо-западных склонов Главной гряды Крымских гор. На территории Севастополя, где река впадает в Черное море, расположено нижнее течение этой реки протяженностью 21,6 км, от села Фронтное до села Любимовка.

Реки Озенбаш (Биюк-Узенбаш) и Манаготра, образующие при слиянии реку Бельбек, как и сам Бельбек в верхнем течении являются типичными горными реками и представляют собой непересыхающие потоки с узким русловым быстрым течением и высокими крутыми берегами.

Долина реки имеет ящикообразный поперечный профиль, что объясняется интенсивной, преимущественно боковой эрозией. При этом ширина долины 1000–1500 м, в нижнем течении до 2000 м. Для нее характерны крутые склоны и широкое дно.

В среднем и нижнем течении Бельбек течет со значительно меньшими, чем в верховьях, уклонами, по широкой V-образной долине. Долина реки при приближении к морю постепенно расширяется. В нижнем течении реки Бельбек прорезает мощные глинистые наносы. Вблизи моря русло похоже на овраг шириной в 25–30 м.

В устьевой части русло меандрирует, деформируется, особенно на расстоянии 50–100 метров от места впадения в море. Среднемноголетний расход воды реки Бельбек, у с. Фруктовое равен 1,97–2,15 м³/год.

В степной части бассейна вода реки используется для орошения, из-за чего в поливной период (июль – сентябрь) река обычно имеет минимальный расход. В это время Бельбек здесь по существу представляет собой ручей с расходом порядка 0,1 м³/с. Основной вклад в величину годового стока вносят паводки со значениями расхода воды порядка 10 – 20 м³/с и выше.

Река Кача – тоже одна из значительных рек Крыма. Ее длина 69 км, площадь водосборного бассейна 573 км², она имеет 15 притоков. Начало реки образовано слиянием рек Биюк-Узень и Писара на северо-западном склоне Бабуган-Яйлы. В верхнем и среднем течении река является типичной горной рекой, после пересечения внешней гряды Крымских гор выходит на равнинную

местность и впадает в Черное море южнее поселка Кача к северу от города Севастополя.

Река имеет три притока длиной более 10 км, общая длина которых 50 км. Основные притоки реки Кача – р. Стиля, р. Марта, и р. Чурук-Су. Практически все притоки впадают в реку Кача в верхнем ее течении за исключением реки Чурук-Су, которая впадает в среднем течении реки Кача. Кача пересекает внутреннюю гряду Крымских гор по образованному ей ущелью с отвесными стенами, известному как Качинский каньон или Качинские ворота.

Водный режим реки Кача соответствует климатическим особенностям юго-западного Крыма: во время сильных дождей осенью и зимой река полноводна, а в жаркое время года летом в связи с использованием воды на орошение в нижнем течении сток значительно уменьшается.

В результате ранее выполненных работ по спрямлению русла реки и перепланировки поймы в период паводков река образует два рукава – новое канализованное русло реки, впадающее в Черное море у с. Орловка, и старое русло реки, отходящее от основного русла реки Кача в районе с. Вишневое и впадающее в Черное море южнее поселка Кача.

Среднегодовой расход воды реки Кача составляет $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует стоку 53 млн м^3 в год. В этом несложно убедиться, умножив расход на $3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$, что соответствует одному году. Норма стока реки составляет 51,7 млн м^3 , сток маловодных лет при статистической обеспеченности 75 и 95 % – соответственно 36,6 и 23, 2 млн м^3 . Таким образом, вероятность реализации стока менее 23 млн м^3 составляет 5 %, то есть это бывает раз в 20 лет [4].

1.2. Водохранилища естественного стока

Общий объем Крымских водохранилищ естественного стока равен 250 млн м^3 , что составляет лишь 27,5 % естественного поверхностного стока. Они заполняются во время осенне-зимнего периода и во время весенних паводков, в редких случаях – летом при ливнях. Следует отметить, что далеко не во все годы происходит их наполнение до нормального подпорного уровня (НПУ). В этом отношении выигрывают наливные водохранилища Северо-Крымского канала, которые в этом смысле являются гарантированным источником водоснабжения после их искусственного заполнения в течение года. Правда, в последние годы и водохранилища естественного стока нередко пополняют водой из скважин, карьеров и других источников. Основные водохранилища показаны на рис. 1.3, а их параметры приведены в табл. 1.2.

Водохранилище Тайганское находится недалеко от города Белогорск. В недавнем прошлом там была сооружена самая большая плотина в Крыму. Его объем составляет 13,8 млн м^3 , длина 2 км, максимальная ширина тоже около 2 км, максимальная глубина составляет 16,5 метров. Строительство плотины началось в 1934 году на боковой Джайваганской балке реки Биюк-Карасу, и

было окончено в 1938 году. Тайганское водохранилище построено для орошения близлежащих сельскохозяйственных угодий, а также в рекреационных целях, для рыболовства и отдыха населения. Сейчас Тайганское водохранилище через водосброс заполняется водой из Белогорского водохранилища, которое находится в непосредственной близости.



Рис. 1.3. Северо-Крымский канал и водохранилища Крымского полуострова

Аянское водохранилище находится недалеко от Симферополя, возле села Заречное. Относится к водохранилищам естественного стока. Основным источником наполнения водохранилища служит многоводный карстовый источник Аян. Аянское водохранилище было построено еще в 1928 году. Начальный объем Аянского водохранилища находился на отметке 1,75 млн кубических метров, однако после проведения реконструкции водохранилища его объем увеличился до 3,9 млн м³. Длина Аянского водохранилища около 1,5 км, максимальная глубина составляет 24,5 метров, максимальная ширина – 0,5 км. Водные ресурсы водохранилища служат для обеспечения водой Симферополя. Аянское водохранилище располагается в окружении гор Крыма и вода в нем очень чистая. Аянское водохранилище относят к урочищу Аян, куда кроме водохранилища входит карстовый источник Аян и карстовая пещера Аянская.

Таблица 1.2

Основные характеристики водохранилищ

Название	Местоположение	Источник питания	Характеристики при НПУ		Проектное назначение
			Площадь зеркала, га	Проектный объем, млн м ³	
Водохранилища естественного стока					
Альминское	с. Почтовое	р. Альма	86	6,2	орошение
Белогорское	г. Белогорск	р. Биюк-Карасу	225	23,3	орошение
Аянское	с. Заречное, Симферопольский р-н	р. Аян	42	3,9	водоснабжение
Балановское	с. Баланово, Белогорский р-н	р. Зуя	40,7	5,0	орошение
Бахчисарайское	г. Бахчисарай	р. Кача	99,5	6,9	орошение
Загорское	с. Синапное, Бахчисарайский р-н	р. Кача	156	27,9	водоснабжение
Изобильненское	с. Изобильное, г. Алушта	р. Улу-Узень	61	13,3	водоснабжение
Кутузовское	с. Верхняя Кутузовка, г. Алушта	р. Демерджи	9,40	1,1	орошение
Львовское	с. Долинное, Кировский р-н	р. Мокрый Индол, бал-ка Змеиная	27,8	2,2	орошение
Партизанское	с. Партизанское, Симферопольский р-н	р. Альма	225	34,4	водоснабжение
Симферопольское	г. Симферополь	р. Салгир	317	36,0	водоснабжение, ТЭЦ, орошение,
Старокрымское	г. Старый Крым	р. Чорох-Су	43	3,2	водоснабжение, орошение
Счастливое-II	с. Счастливое, Бахчисарайский р-н	р. Манаготра	70	11,8	водоснабжение
Тайганское	г. Белогорск	б. Джавайганская, р. Биюк- Карасу	196,8	13,8	орошение
Чернореченское	г. Севастополь	Скельский источник, р. Узунджа	1547	64,2	водоснабжение, орошение
ВСЕГО: 15 водохранилищ			3146,2	253,1	

Балановское водохранилище было построено в 1974 году на реке Зуя (Зуйка) для орошения окрестных сельскохозяйственных земель.

Плотину Балановского водохранилища возвели на реке Зуя, длина плотины 350 метров. Площадь водного зеркала Балановского водохранилища невелика, около 40,7 га, общий объем водохранилища 5,07 млн метров кубических. Глубина этого водохранилища Крыма в отдельных местах достигает 38 метров. Длина Балановского водохранилища составляет около 2,5 километров. Это горное водохранилище имеет вытянутую форму, оно заполняется из речки Зуйки, которая берет свое начало в горах, где много родников.

Симферопольское водохранилище расположено на реке Салгир, в 157 км от ее устья. Строительство его плотины завершилось осенью 1954 г. Длина плотины 554 м, ширина по гребню 10 м, по подошве – 248 м, наибольшая высота 40 м. Нормальный подпорный уровень и уровень мёртвого объёма (УМО) водохранилища составляют 292 м и 270 м над уровнем моря. Полный и полезный объём водохранилища 36 млн м³ и 34 млн м³ соответственно. Площадь зеркала водохранилища при НПУ и УМО равны 3,2 км² и 0,3 км² [11].

Партизанское водохранилище расположено на реке Альме. Оно построено в 1966 г. в 40 км от устья этой реки. Длина плотины 356 м, ширина по гребню 10 м, по основанию – 290 м, наибольшая высота 42 м, отметка гребня плотины 274 м над уровнем моря. Пропускная способность водоспуска 286 м³/с. Водозаборное сооружение состоит из шахтной водозаборной башни, тоннеля и открытой камеры. Суммарная пропускная способность гидроузла составляет 292 м³/с. Нормальный подпорный уровень (НПУ) и уровень мёртвого объёма (УМО) водохранилища составляют 272 м и 245 м над уровнем моря. Полный и полезный объём водохранилища 34,4 млн м³ и 32,2 млн м³. Площадь зеркала водной поверхности при НПУ 2,3 км². Длина водохранилища при НПУ 4,5 км, максимальная ширина 1,5 км, средняя и максимальная глубина 15 м и 40 м соответственно [8].

Основным водохранилищем естественного стока для города Севастополя является Чернореченское водохранилище. Оно расположено на р. Черная, образовано плотиной рядом с селом Озёрное. Длина плотины 1274 м. Чаша Чернореченского водохранилища расположена в юго-восточной части Байдарской долины, в верхнем течении реки Черной, ниже устья реки Бага, на территории Балаклавского района города Севастополя. Байдарская долина расположена на высоте 300–400 метров над уровнем моря в межгорной котловине между двумя грядами Крымских гор [5]. В 1956 г. там была сначала сооружена плотина высотой 28 м. Реконструкция плотины, проведенная в 1977–1984 годах, позволила увеличить высоту плотины до 36 м [9]. Водохранилище имеет длину 3,45 км, ширину 3,55 км, средняя глубина – 10,7 м, максимальная глубина – 31,7 м.

Нормальный подпорный уровень водохранилища соответствует 36 м. Полный объём водохранилища при НПУ 64,2 млн м³, полезный – 61,2 млн м³, площадь водного зеркала при НПУ 6,04 км². Среднесуточный забор воды из водохранилища достигает 120 тыс. м³, хотя после введения в эксплуатацию ковшового водозабора на р. Бельбек в целях экономии воды летом его сократили до 50 тыс. м³.

В табл. 1.3 приведены данные о поквартальных запасах воды в водохранилищах естественного стока в 2019 г. Данные по Чернореченскому водохранилищу там отсутствуют в связи с тем, что оно относится к другому субъекту федерации, с особым статусом базы Черноморского флота РФ.

Таблица 1.3

Динамика фактических запасов воды в водохранилищах естественного стока в 2019 г.

№ п/п	Водохранилище	млн НПУ, м ³	I квартал		II квартал		III квартал		IV квартал	
			млн м ³	% от НПУ	млн м ³	% от НПУ	млн м ³	% от НПУ	млн м ³	% от НПУ
1	Старокрымское	3,2	1,5	48	2,1	67	1,7	55	1,4	43
2	Бахчисарайское	6,9	4,6	67	3,8	55	1,8	26	1,0	15
3	Альминское	6,2	3,8	61	3,8	61	2,9	47	2,7	44
4	Аянское	3,9	3,9	100	2,4	62	1,0	26	0,6	14
5	Симферопольское	36,0	25,8	72	27,1	75	19,9	55	13,8	38
6	Партизанское	34,4	26,9	78	26,2	76	19,4	57	13,4	39
7	Белогорское	23,3	19,0	82	14,4	62	7,6	33	4,3	18
8	Тайганское	13,8	13,8	100	13,0	94	8,2	59	5,3	39
9	Счастливленское	11,8	9,7	82	8,9	75	3,5	30	4,5	38
10	Балановское	5,0	2,9	58	3,8	75	3,0	59	2,3	46
11	Загорское	27,9	21,0	79	21,8	78	17,8	64	10,9	39
12	Льговское	2,2	1,8	83	1,7	78	1,5	69	1,4	64
13	Изобильненское	13,3	11,1	84	12,3	93	9,8	74	8,3	63
14	Кутузовское	1,1	1,1	100	1,0	86	0,4	34	0,4	36
15	Чернореченское	64,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	ВСЕГО:	188,9	147,9	78	142,2	75	98,4	52	70,3	37,2

Из табл. 1.3 видно, что наименьшие запасы воды в четвертом квартале, а максимальное наполнение, в основном, во втором квартале.

В табл. 1.4, приведена оценка состояния загрязненности воды водохранилищ естественного стока Крыма по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды. Из таблицы видно, что только в Балановском и Изобильненском водохранилищах сравнительно чистая вода.

Таблица 1.4

**Оценка состояния загрязненности воды водохранилищ и рек Крыма
по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды**

Водохранилище	Коэффициент комплексности (средний), %	Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды	Класс и разряд загрязненности воды	Характеристика состояния загрязненности воды
Альминское	20,00	2,47	3 «а»	Загрязненная
Аянское	12,59	2,12	3 «а»	Загрязненная
Балановское	8,39	1,54	2	слабо загрязненная
Бахчисарайское	12,86	2,38	3 «а»	Загрязненная
Белогорское	16,34	2,24	3 «а»	Загрязненная
Загорское	16,79	2,78	3 «а»	Загрязненная
Изобильненское	12,44	1,70	2	слабо загрязнённая
Кутузовское	23,46	2,21	3 «а»	Загрязненная
Льговское	25,92	3,46	3 «б»	очень загрязненная
Партизанское	15,75	2,54	3 «а»	Загрязненная
Симферопольское	14,51	2,39	3 «а»	Загрязненная
Старокрымское	33,72	3,43	3 «б»	очень загрязненная
Счастливенское	10,26	1,35	2	слабо загрязнённая
Тайганское	16,79	2,70	3 «а»	Загрязненная
Биюк-Карасу	21,86	3,35	4 «а»	Грязная

1.3. Наливные водохранилища

Основные наливные водохранилища Крыма перечислены в табл. 1.5, там же указаны и их характеристики. До 2014 г. они заполнялись через Северо-Крымский канал водой из Каховского водохранилища на р. Днепр, с чем и связано название источника питания этой группы водохранилищ (СКК).

Межгорное водохранилище расположено на левом притоке р. Тобечокрак, в Жаворонской балке, в Сакском районе Республики Крым. Образовано земляной плотинной высотой 37,5 м, длиной 1,8 км вблизи с. Скворцово под Симферополем. Оно относится к водохранилищам наливного типа и считается самым крупным из наливных искусственных водоёмов Крыма. Проектом строительства второй очереди Северо-Крымского канала (1977 г.) предполагалось создание еще нескольких наливных водохранилищ для обеспечения водой Симферополя, Севастополя и курортов южного берега Крыма. Однако из планируемых водохранилищ было построено только Межгорное для водоснабжения Симферополя и Севастополя. Строительство осуществлялось в 1981–1991 гг. Межгорненский гидроузел введён в действие в 1989 г.

Таблица 1.5

Основные характеристики наливных водохранилищ Крыма

Водохранилище	Местоположение	Источник питания	Характеристики при НПУ		Проектное назначение
			Площадь зеркала, га	полный проектный объем, млн м ³	
Зеленоярское	с. Зеленый Яр, Ленинский р-н	СКК	51	3,0	Водоснабжение
Ленинское	с. Ленинское, Ленинский р-н	СКК	212	7,7	Водоснабжение
Межгорное	с. Скворцово, Симфероп. р-н	СКК	400	50,0	Водоснабжение
Самарлинское	с. Виноградное, Ленинский р-н	СКК	135	8,0	Водоснабжение
Сокольское	с. Сокольское, Ленинский р-н	СКК	65	2,3	рекреация
Станционное	с. Станционное, Ленинский р-н	СКК	270	24,0	Водоснабжение
Феодосийское	с. Новопокровка, Кировский р-н	СКК	242	15,4	Водоснабжение, орошение
Фронтное	село Фронтное, Ленинский р-н	СКК	645	35,0	Водоснабжение
ВСЕГО: 8 водохранилищ			2020	145,4	

Нормальный подпорный уровень 38 м. Проектный объем водохранилища при НПУ 50 млн м³, фактический (до апреля 2014 г.) – 25,6 млн м³, площадь водного зеркала при НПУ 4 км², длина водохранилища 4 км, максимальная ширина – 1,2 км, средняя глубина – 12,5 м; максимальная – 33 м. Длина береговой линии около 13 км. Межгорное – крупнейшее водохранилище Республики Крым и второе по величине на Крымском полуострове (после Чернореченского водохранилища в Севастополе). Проектное назначение водохранилища – аккумуляирование запаса воды, коммунально-бытовое и промышленное водоснабжение (в основном г. Симферополя) [12].

Таблица 1.6

Динамика фактических объемов водохранилищ Республики Крым в 2019 году

№ п/п	Водохрани- лище	НПУ, млн м ³	I квартал		II квартал		III квартал		IV квартал	
			млн м ³	% от НПУ	млн м ³	% от НПУ	млн м ³	% от НПУ	млн. м ³	% от НПУ
1	Ленинское	7,70	2,29	29,7	3,87	50,2	3,29	42,8	3,88	50,4
2	Сокольское	2,26	0,80	35,4	0,80	35,4	0,80	35,4	1,1	48,7
3	Самарлинское	8,00	2,45	30,6	3,50	43,8	4,02	50,2	3,90	48,8
4	Феодосийское	15,37	6,48	42,1	7,94	51,6	7,99	52,0	7,88	51,3
5	Станционное	24,00	9,19	38,3	12,40	51,7	7,47	31,1	6,74	28,1
6	Фронтное	35,00	1,46	4,2	1,46	4,2	1,46	4,2	1,46	4,2
7	Зеленоярское	3,02	2,63	87,0	2,17	71,7	2,00	66,2	2,49	82,4
8	Межгорное	50,00	1,32	2,6	1,32	2,6	1,32	2,6	1,32	2,6
	ВСЕГО:	145,35	26,61	18,3	33,45	23,0	28,38	19,5	28,78	19,8

Фронтное водохранилище находится рядом с селом Фронтное Ленинского района в Крыму (не путать с селом Фронтное близ Севастополя). Относится к группе наливного типа. Фронтное водохранилище предназначено для водоснабжения Керчи и Феодосийской курортной зоны. Вода из Северо-Крымского канала подавалась в водохранилище насосной станцией. Водохранилище с июня 1979 г. эксплуатируется в каскаде со Станционным и Зеленоярским водохранилищами. Фронтное водохранилище имеет объём 35 млн. м³, длину 3 км; его максимальная ширина 5,8 км; максимальная глубина 13,5 м; средняя глубина – 5,4 м; площадь зеркала 645 га. Длина береговой линии – 11,0 км.

Земляная плотина с высотой 15 м имеет длину 288 м. Аварийный сброс рассчитан на расход 14,6 м³/с. Он запроектирован из двух ниток металлических труб длиной по 160 м и диаметром 1200 мм. С южной стороны водохранилища имеется дамба высотой 4 м [13].

Станционное (Керченское) водохранилище находится вблизи села Станционное Ленинского района в Крыму. Относится к группе наливного типа.

Длина водохранилища 3,2 км; максимальная ширина – 1,1 км; максимальная глубина – 22,4 м; средняя глубина – 8,9 м; площадь зеркала – 270 га; объём 24 млн. м³. Земляная плотина длиной 572,5 м; высотой 25 м. Длина береговой линии – 7,5 км.

Станционное водохранилище также эксплуатируется в каскаде с Фронтным и Зеленоярским водохранилищами. Вода из Северо-Крымского канала подаётся в водохранилище насосной станцией с расходом 9,7 м³/с. Водозаборное сооружение тоннельного типа с размещением башни в водохранилище. Пропускная способность 38,8 м³/с. Тоннель проходит в глинах и известняках и представляет собой трубу диаметром 2124 мм. Длина данного тоннеля составляет 279 м.

В таблице 1.7 приведена оценка состояния загрязненности воды в наливных водохранилищах Крыма по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды.

Таблица 1.7

**Оценка состояния загрязненности воды водохранилищ и рек Крыма
по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды
(по РД 52.24.643–2002)**

Водохранилище	Коэффициент комплексности (средний), %	Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды	Класс и разряд загрязненности воды	Характеристика состояния загрязненности воды
Ленинское	30,78	4,11	4 «а»	Грязная
Межгорное	35,08	3,55	4 «а»	Грязная
Самарлинское	30,30	3,58	3 «б»	Очень загрязненная
Станционное	34,01	4,43	4 «а»	Грязная
Феодосийское	35,91	3,87	4 «а»	Грязная
Фронтное	59,57	7,37	5	Экстремально грязная

Для наливных водохранилищ особенно большое значение имеет учет потерь воды на испарение и фильтрацию. Испарение с поверхности водохранилища пропорционально площади зеркала воды S . Оно усиливается также с увеличением температуры и с усилением ветра. Относительные потери накопленного объема воды V на испарение за определенный период времени равны

$$\frac{\Delta V}{V}; \text{ где } \Delta V = S * \Delta h.$$

Здесь Δh - уменьшение уровня воды (толщина испарившегося слоя воды).

В случае водохранилища с вертикальными стенками высотой H его объем $V = H * S$, поэтому

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{S * \Delta h}{H * S} = \frac{\Delta h}{H}.$$

Таким образом, эти относительные потери (в %) будут обратно пропорциональны глубине водохранилища H при неизменной площади зеркала воды. Для водохранилища с произвольной формой дна зависимость от глубины сложнее, требуется знать гипсометрическую кривую. Тем не менее, и в этом случае можно утверждать, что чем более пологие берега – тем больше относительные потери.

В известном смысле этот испаряющийся верхний слой воды толщиной Δh представляет собой заранее запланированные потери, то есть это некий аналог мертвого объема водохранилища вблизи дна. В условиях Крыма с поверхности водохранилища или озера испаряется около 1 метра воды. При длительных засухах, например, продолжительностью 3 года, потерянным будет уже трехметровый слой. Если не считать осадки, попадающие в наливное водохранилище, то это означает, что мелкое водохранилище глубиной $H < 3$ м не может использоваться для столь длительного хранения воды.

Для небольшого водохранилища счет идет уже не на годы хранения, а на месяцы. И для расчета потерь на испарение в этом случае уже недостаточно данных о среднегодовом испарении. Для того же Чернореченского водохранилища актуальным является хранение воды с апреля по октябрь. Соответственно, именно для этого периода надо знать среднемесячные температуры воды в поверхностном слое водохранилища и среднемесячные значения скорости ветра для расчета потерь на испарение.

Фильтрация наоборот усиливается для глубоких водохранилищ связи с большим напором. Скорость фильтрационного потока при турбулентной фильтрации пропорциональна корню из гидравлического уклона I , то есть:

$$v = k \cdot \sqrt{I}.$$

В свою очередь, гидравлический уклон связан с высотой плотины H и ее шириной у основания L соотношением:

$$I = i_0 + \frac{H}{L}.$$

Таким образом, потери на фильтрацию пропорциональны $\sqrt{H}$ и для глубоких водохранилищ они сильнее. Разумеется, эти потери зависят и от типа грунта через коэффициент фильтрации k .

Меры по уменьшению фильтрации из водохранилищ требуют очень больших затрат. Кроме того, в Горном Крыму строительство больших водохранилищ вообще проблематично из-за высокой сейсмичности региона.

В связи с этим строительство новых крупных водохранилищ для многолетнего хранения накопленных в многоводные годы запасов воды нецелесообразно как в случае неглубоких, но больших по площади водохранилищ, так и в случае глубоких водохранилищ с относительно небольшим зеркалом воды. В последние годы предпочтение отдается строительству сравнительно малых водохранилищ объемом 8–15 млн м³.

Глава 2

РЕЖИМЫ ЗАПОЛНЯЕМОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ

2.1. Чернореченское водохранилище

Главным источником водоснабжения города Севастополя является Чернореченское водохранилище, находящегося на реке Черная, в городе Севастополь. Оно является самым крупным водохранилищем города Севастополя и Крымского полуострова как по полезному, так и по полному объёмам (рис. 2.1).

Чернореченское водохранилище относится к водохранилищам руслового типа, вид регулирования – многолетнее. Основным источником его наполнения служит сток реки Чёрной – одного из самых стабильных речных водных потоков, текущих по территории Крымского полуострова.

Водосбор Чернореченского водохранилища охватывает северо-западные склоны массива горы Ай-Петри, главной гряды и южные склоны второй гряды Крымских гор. Дождевая и талая вода стекает по части распределенных горных сетей малых рек и ручьёв, подземной системе карстовых полостей в водохранилище и непосредственно в реку Чёрную [12].

Водохозяйственный баланс водохранилища складывается из приходной и расходной частей.



Рис. 2.1. Схема размещения Чернореченского водохранилища

Приходную часть складывается из притока в водохранилище по основной реке Черная, других боковых притоков и склонового стока в водохранилище. Кроме того, существенный вклад дают атмосферные осадки на зеркало водоема и приток подземных вод в водохранилище через его ложе. Расходную часть баланса составляют: забор воды из водохранилища на водоснабжение и другие хозяйственно-бытовые потребности, сток через сооружения основного гидроузла, потери на испарение с зеркала водохранилища, потери в сооружениях гидроузла, фильтрация через дно, фильтрационный поток через плотину.

Чернореченский гидроузел состоит из следующих основных сооружений: глухая земляная плотина, земляная напорная дамба, водозаборный туннель с затопленным оголовком, открытый водосброс автоматического действия с гравитационной водосливной плотиной в голове водосброса. Водозаборное сооружение, эксплуатируемое с 1959 года, состоит из подводящего канала, железобетонной галереи, смотрового колодца, затопленного входного оголовка туннеля с камерой задвижек, туннеля гасителя и отводящего канала. Открытый подводящий канал длиной 408,5 м и его продолжение – закрытая подводная железобетонная галерея длиной 323 м – расположены в чаше водохранилища ниже уровня мертвого объема (УМО). Ширина канала по дну 8 м, заложение откосов 2 м, крепление откосов – одиночное каменное мощение на подготовке из песка. Железобетонная галерея имеет сечение в свету 3х5 метров, уклон ее в сторону донного водовыпуска равен 0,002, максимальная глубина заложения – около 9 м от дна водохранилища. Подводящий канал и железобетонная галерея предназначены для забора воды из водохранилища и для опорожнения водохранилища до отметок ниже уровня мертвого объема. Створ плотины находится в 1,5 км северо-восточнее села Озерное.

Пополнение водохранилища осуществляется в основном за счет весеннего таяния снега в горах и достаточно интенсивных дождей. Анализ режима наполнения Чернореченского водохранилища по данным за последние годы (рис. 2.2) показывает, что в годы с достаточно большим количеством осадков зимой и весной оно практически полностью заполняется уже в апреле, в мае заполняемость остается прежней и начиная с июня она уменьшается до декабря включительно. В маловодные годы, например, в 2017 г., максимум заполняемости достигался только в июне, и он был примерно на 10 % меньше, чем в многоводные годы. При этом заполняемость водохранилища уменьшалась к ноябрю примерно до половины его объема, после чего начиналось увеличение доступного объема воды в водохранилище.

В 2020 г. заполняемость была аномальной, осеннего роста заполняемости не наблюдалось вообще и даже к середине января 2021 г. запасы воды в водохранилище составляли всего 7 млн м³, половина которых приходилось на мертвый объем водохранилища. Краткосрочная аномалия отмечалась в 2018 г. во второй половине ноября. По всей видимости, она связана не только со слабыми осадками, но и с повышенным водозабором из водохранилища. В

декабре этого года и в других водохранилищах Крыма количество воды было в два раза меньше, чем обычно, что связано с малоснежной зимой.

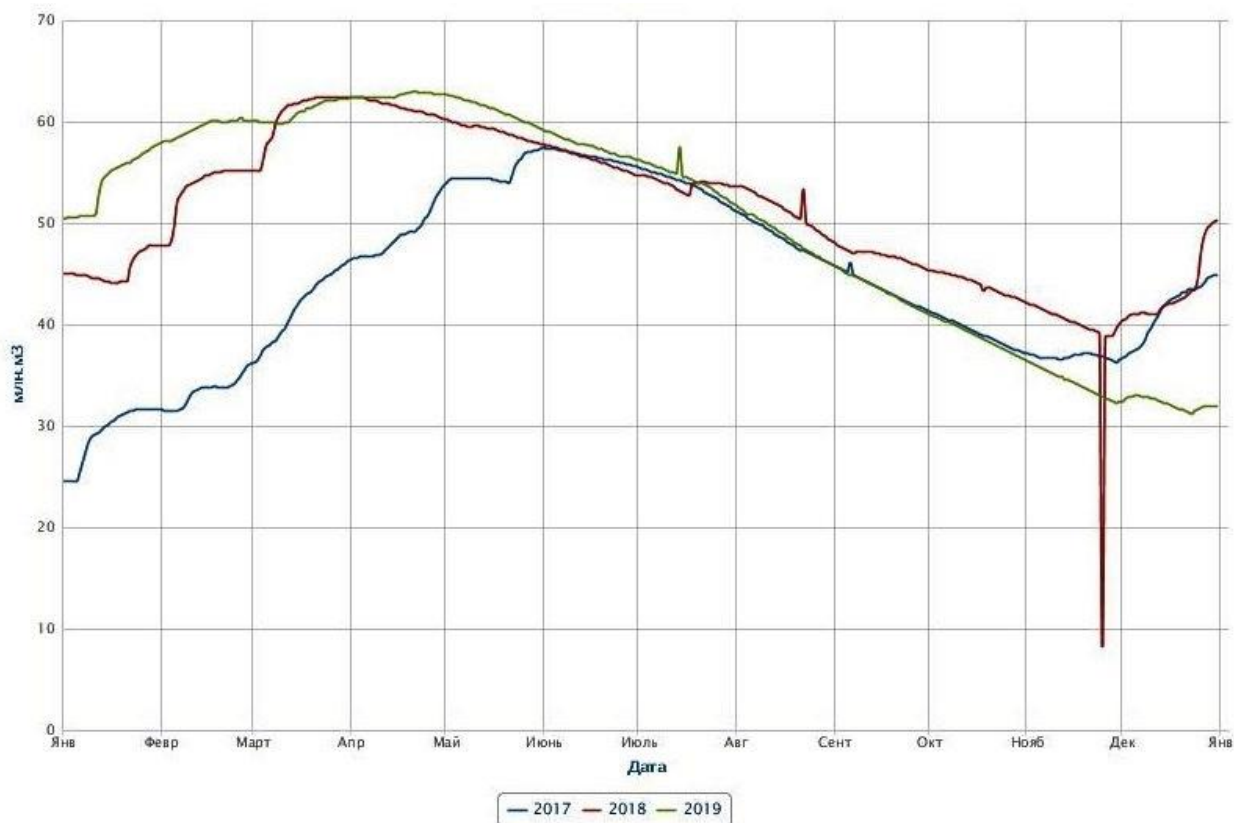


Рис. 2.2. Режим наполнения Чернореченского водохранилища в 2017-2019 гг.
Фактические значения объема воды указаны в млн м³

На рис. 2.3 приведены данные ежедневного мониторинга, из которых видно, что за 10 суток с 31 августа 2020 г. по 9 сентября 2020 г. заполнение водохранилища уменьшилась на 2,1 % полезной емкости и составило 36,1 %. Это соответствовало 20,6 млн м³. Как уже отмечалось, потом запасы воды снизились до 7 млн м³, однако ГУПС «Водоканал» к тому времени уже прекратил размещать такого рода подробные данные мониторинга в режиме свободного допуска. На практике удобнее пользоваться архивами данных на сайтах [11, 13], они позволяют получать графики изменения уровня воды в водохранилищах, приведенные в приложении.

Хозяйственно-питьевое водоснабжение населения в городе Севастополе обеспечивается из подземных и поверхностных источников: за 2019 год на территории города Севастополя эксплуатировалось 13 источников централизованного водоснабжения, в том числе 1 поверхностный источник (Чернореченское водохранилище) и 12 подземных.

Для употребления воды согласно установленным требованиям для хозяйственно-бытовых нужд, проводится мониторинг воды в водохранилище, данные которого приведены в табл. 2.1 по состоянию на 2019 г.

Таблица 2.1

Сведения о загрязнении водных объектов – источников хозяйственно-питьевого водоснабжения за 2019 год

Наименование водного объекта	Кол-во постоянных створов наблюдений	Наименование загрязняющего вещества	Средняя концентрация, мг/л	Исследовано проб	в том числе, %				Численность населения, пользующегося питьевой водой из данного источника, тыс. чел.
					до 1 ПДК	1,1- 2,0 ПДК	2,1- 5,0 ПДК	> 5,1 ПДК	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Чернореченское воодохранилище	1	нитраты	0,760	4	4	0	0	0	337,5
		нитриты	0,003						
		хлориды	10						
		аммиак и аммоний ион	0,13						
		сульфаты	5,1						
		Фтор	0,14						

2.2. Симферопольское водохранилище

Симферопольское водохранилище находится на реке Салгир (рис. 2.4). Оно образовано плотиной Симферопольского гидроузла, сооруженной в 157 км от устья реки Салгир. Строительные работы на плотине были завершены еще осенью 1954 года. Основу гидроузла составляют такие сооружения, как грунтовая плотина, водозаборное и водосбросное сооружения. Грунтовая плотина сложена аптскими глинами. Противофильтрационным элементом плотины является железобетонный зуб и цементационная завеса. Длина плотины 554 метра, ширина по гребню 10 м, по подошве – 247,5 метра, наибольшая высота 40 м. В основании плотины расположена железобетонная галерея длиной 197 метров, в которой проложены две нитки металлических трубопроводов диаметром 0,8 метра и одна нитка диаметром 0,4 метра. Водосброс открытого типа расположен по правому берегу в створе плотины, включает подводящий канал длиной 118 м, быстроток длиной 196 метра и водобойный колодец. Оголовок водосброса семипролётный, ширина каждого пролёта 6 метров, пролёты перекрываются сегментными затворами. Сооружения Симферопольского гидроузла относятся к I классу.

Нормальный подпорный уровень и уровень мёртвого объёма водохранилища составляют 292 метров и 270 метров над уровнем моря по Балтийской системе (БС), форсированный подпорный уровень (ФПУ) 293 метра БС. Полный и полезный объём водохранилища равны 36 млн. м³ и 34 млн. м³ соответственно. Площадь зеркала воды водохранилища при НПУ и УМО составляют 3,17 км² и 0,3 км². Длина водохранилища при НПУ 4,6 км, максимальная ширина 1,5 км, средняя и максимальная глубина 11 и 32 метра соответственно. Симферопольское водохранилище имеет русловый тип, осуществляет многолетнее регулирование стока. Главное назначение водохранилища – питьевое и хозяйственно-бытовое водоснабжение города Симферополя.

Симферопольское водохранилище осуществляет основной сбор водных ресурсов с реки Салгир и её верхних притоков, по этой причине в засушливые годы особенно поднимается вопрос о заполнении водохранилища, а в периоды повышенной водности – проблемы с переполнением водохранилища. Летом 2020 г. был проложен временный трубопровод для переброски воды в Симферопольское водохранилище из Тайганского водохранилища. Временный трубопровод состоит из 15 ниток с тремя передвижными насосными станциями на каждой и способен перекачивать в сутки 50 тыс. м³ на расстояние более 50 км. По классу качества вода Симферопольского водохранилища в разные годы характеризуется как слабо загрязнённая или загрязнённая [17].



Рис. 2.4. Схема Симферопольского водохранилища

В 2020–2021 гг. Симферопольское водохранилище, как и другие водохранилища Крыма, испытывало последствия затянувшейся засухи. По состоянию даже на конец февраля 2021 г. заполнен был только мертвый объем (рис. 2.5). Это было характерно еще только для Загорского водохранилища, снабжающего водой Ялту.

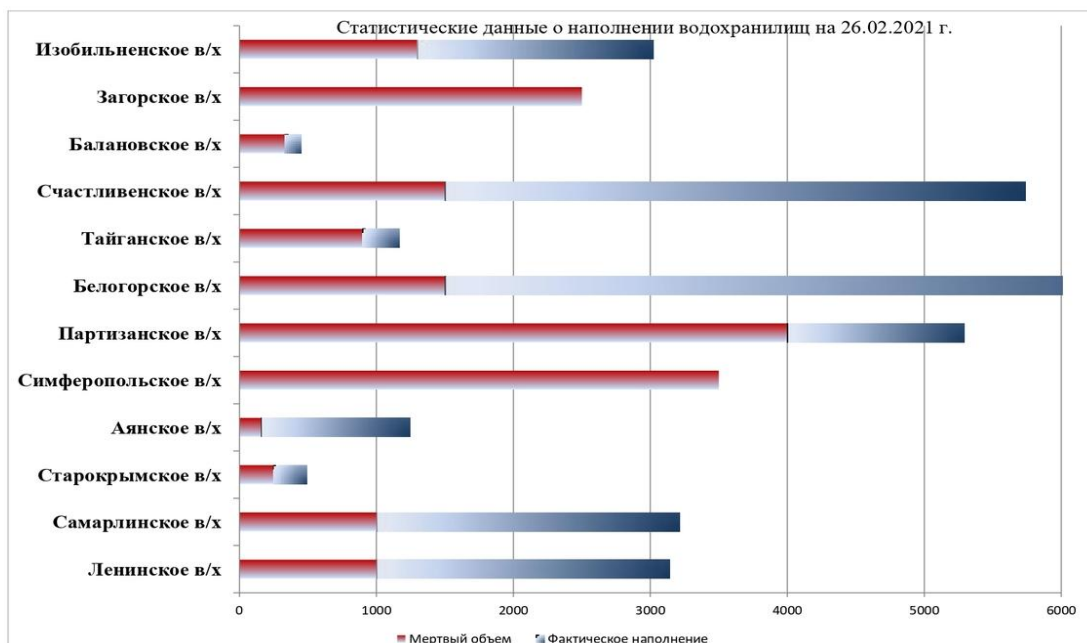


Рис. 2.5. Накопленные объемы воды в водохранилищах Крыма в конце февраля 2021 г. (в тыс. м³). Красным цветом обозначен мертвый объем водохранилищ

2.3. Водохранилища Южного Берега Крыма

Основные источники водных ресурсов Ялты и всего Южного Берега Крыма – это два водохранилища среднего типа, что находятся с северной стороны крымских гор: Счастливенское (11,8 млн м³) и Загорское (27,8 млн м³). Схема их размещения приведена на рис. 2.6. Также дополнительный источник водоснабжения – это небольшие реки и ручьи, стекающие с гор в море.

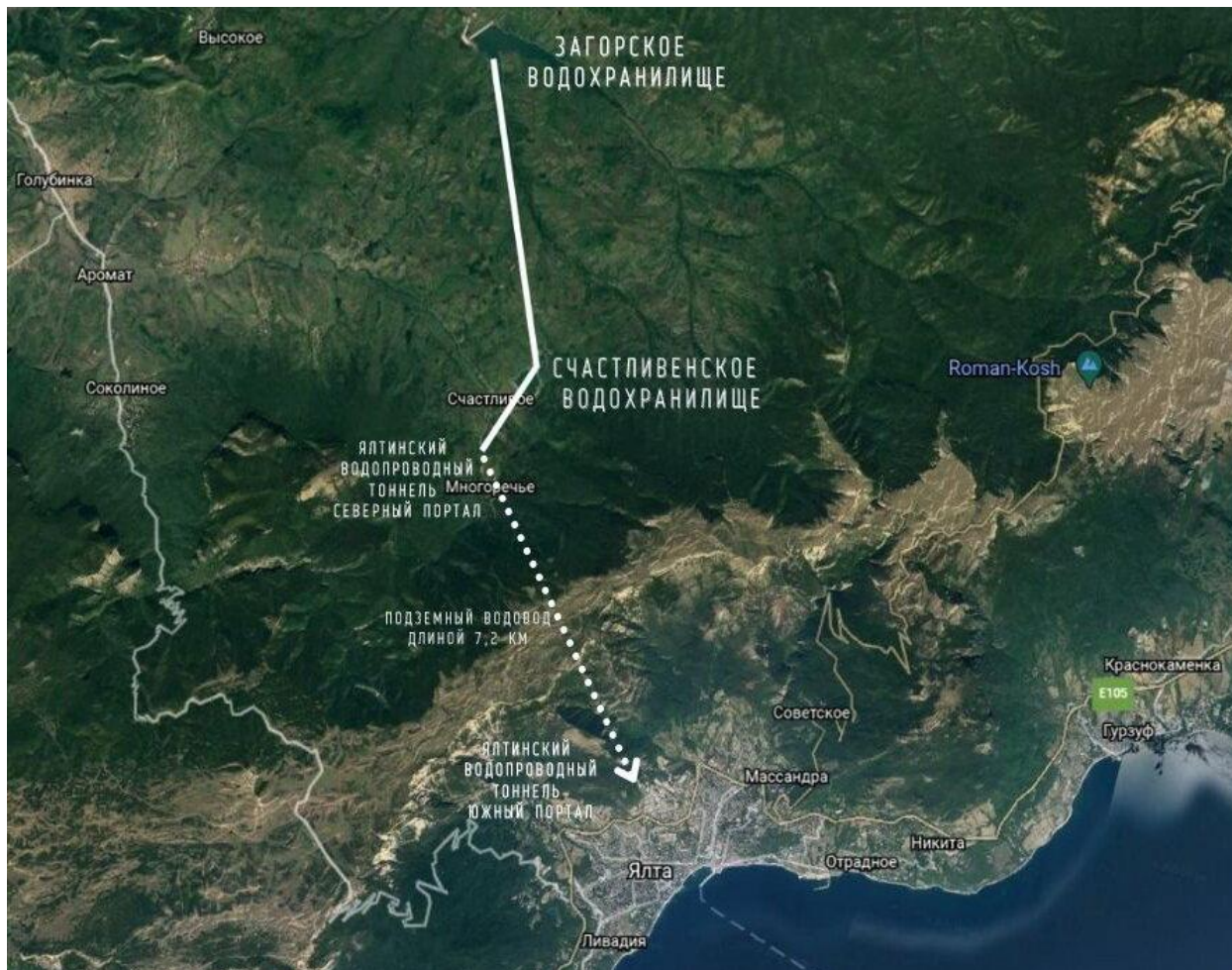


Рис. 2.6. Источники водоснабжения города Ялты и Южного Берега Крыма

Источниками водоснабжения района Большой Ялты являются как местные источники и поверхностный сток на южных склонах Крымских гор так и водохранилища, находящиеся на северных склонах на р. Кача (Загорское водохранилище) и на истоках р. Бельбек (водохранилище Счастливое-2). Кроме того, определенную роль играют источники Счастливое-1 и Ключевское.

Вода из Загорского водохранилища перекачивается насосной станцией 1-го подъема (н/с “Кача”) по водоводу в водохранилище Счастливое-2. Подача воды от Счастливенского гидроузла на южные склоны Крымских гор производится следующим образом. Вода от водозабора Счастливое-1 поступает в водохранилище Счастливое-2, а после того по водоводу к Северному portalу Ялтинского тоннеля, куда по самостоятельному водоводу

подается также вода и от водозабора Ключевское. Это подземный тоннельный водовод под грядой Ай-Петри.

Вода источников, расположенных на северных склонах, по тоннелю длиной 7,3 км под Ялтинской яйлой поступает на водопроводную очистную станцию (ОВС), расположенную в районе г. Ялты выше п. Васильевка. Водоочистная станция обладает проектной мощностью 102 тыс. м³/сут. Станция состоит из двух технологических линий, первая была введена в эксплуатацию в 1964 году, вторая – в 1985 году.

После очистки на водопроводной очистной станции питьевая вода транспортируется в город Ялта и посёлки ЮБК по магистральным водоводам: Ялта-Кастрополь; Ялта-Симеиз; Ялта-Гурзуф и Ялта-Артек.

Счастливенское водохранилище расположено в Бахчисарайском районе Крыма, на северном лесистом склоне Ай-Петринской яйлы, в верховьях реки Бельбек. Оно создано на месте узкой V-образной долины реки Манатогра. Это высокогорное водохранилище – его высота над уровнем моря превышает 450 м. Проектный объем – 11,8 млн м³, протяженность береговой линии – 6,6 км. Площадь водного зеркала при НПУ – 0,67 км². Длина водохранилища – 1,5 км, ширина – 0,6 км. Водохранилище относится к группе естественного стока. Длина земляной дамбы – 450 м. Средний показатель глубины по водохранилищу составляет 18 м, при этом максимальная глубина 53 м.

Для Алушта основными источником водных ресурсов является водохранилище Изобильненское. На реке Улу-Узень сооружен самый крупный на ЮБК искусственный водоем (Алуштинский). Остальные небольшие водоемы (всего их более 30) созданы в долинах рек и сухоречий: над поселком городского типа Партенит, пруд Ай-Ефим над селом Пушкино, озеро Горное у поселка Виноградного, пруд у села Нижняя Кутузовка, пруд на реке Алачук у горы Пакся и др.

Изобильненское водохранилище расположено в поселке Изобильное и в полном объеме снабжает водой город Алушта. Изобильненское водохранилище является самым глубоким на всем Крымском полуострове, его глубина достигает 72 м. Пик половодья приходится на март - апрель, а в летнее время глубина может достигать отметки в 30–35 метров. Максимальный объем водохранилища 13,3 млн м³. Средний объем по году меняется в пределах 8–11 млн м³. Площадь зеркала воды от 0,63 км² до 0,37 км², длина водохранилища 4,2 км, длина береговой линии 5,6 км во время весеннего паводка.

Для удержания такого объема воды в 1979 году была возведена плотина, высотой 70 метров и длиной 550 метров. После отбора воды из водохранилища, она поступает на очистные сооружения и подается в город двумя нитками: первая - западная, ее протяженность около 10 км и вторая - восточная, ее длина составляет 16 км.

2.4. Скважины и иные альтернативные источники водоснабжения

Слабо минерализованные и пресные (менее 1,5 г/л) подземные воды представляет собой важный источник хозяйственно - питьевого водоснабжения в Крыму. Они размещены практически по всей территории полуострова Крым, за исключением сравнительно небольшой по площади территории в юго-восточной части полуострова. Крымский полуостров довольно беден пресными подземными водами. Значительный отбор подземных вод на орошение в 1960–1970-е годы привел к истощению водоносных горизонтов. С целью восполнения запасов подземных вод был построен комплекс сооружений по искусственному пополнению их днепровской водой из Северо-Крымского канала. По состоянию на 2019 год предполагаемые запасы подземных вод с минерализацией до 1,5 г/л составляли 386 млн м³/год.

Ведётся строительство водовода от подземных водозаборов до Феодосии и Керчи (192 км) и рассматривается возможность строительства тоннеля от реки Коккозка до Чернореченского водохранилища (8,7 км). В 2014 году горизонт геологоразведочных работ был увеличен с 200 до 500 м. Для водоснабжения ряда населённых пунктов были пробурены новые скважины.



Рис. 2.7. Карта прогнозных запасов подземных вод Крыма по административным единицам (с минерализацией до 1,5 г/дм³, млн м³/год)

Согласно гидрогеологическому районированию, центральная и северная части Крыма относятся к Крымско-Кавказскому сложному бассейну пластовых вод I порядка, а южная часть входит в Крымско-Кавказский сложный бассейн пластово-блоковых, пластовых вод, вод коры выветривания и лавовых потоков (Москва, ВСЕГИНГЕО, 1985 г.). В Крыму выделяются также два бассейна II порядка: Горно-Крымский бассейн напорных пластово-блоковых вод и Равнинно-Крымский артезианский бассейн (бассейн пластовых напорных вод). В 2019 году новые месторождения подземных вод в эксплуатацию не вводились, прирост запасов подземных вод отсутствует.

Разведанные и оцененные запасы подземных вод составляют (с минерализацией до 1,5 г/л), в том числе: по категории А+В – 636,847 тыс. м³/сут.; по категории С+С – 429 тыс. м³/сут. Всего 1 065,836 тыс. м³/сут.

Идут работы по определению крупных точек выхода подземного стока в акваторию Чёрного моря.

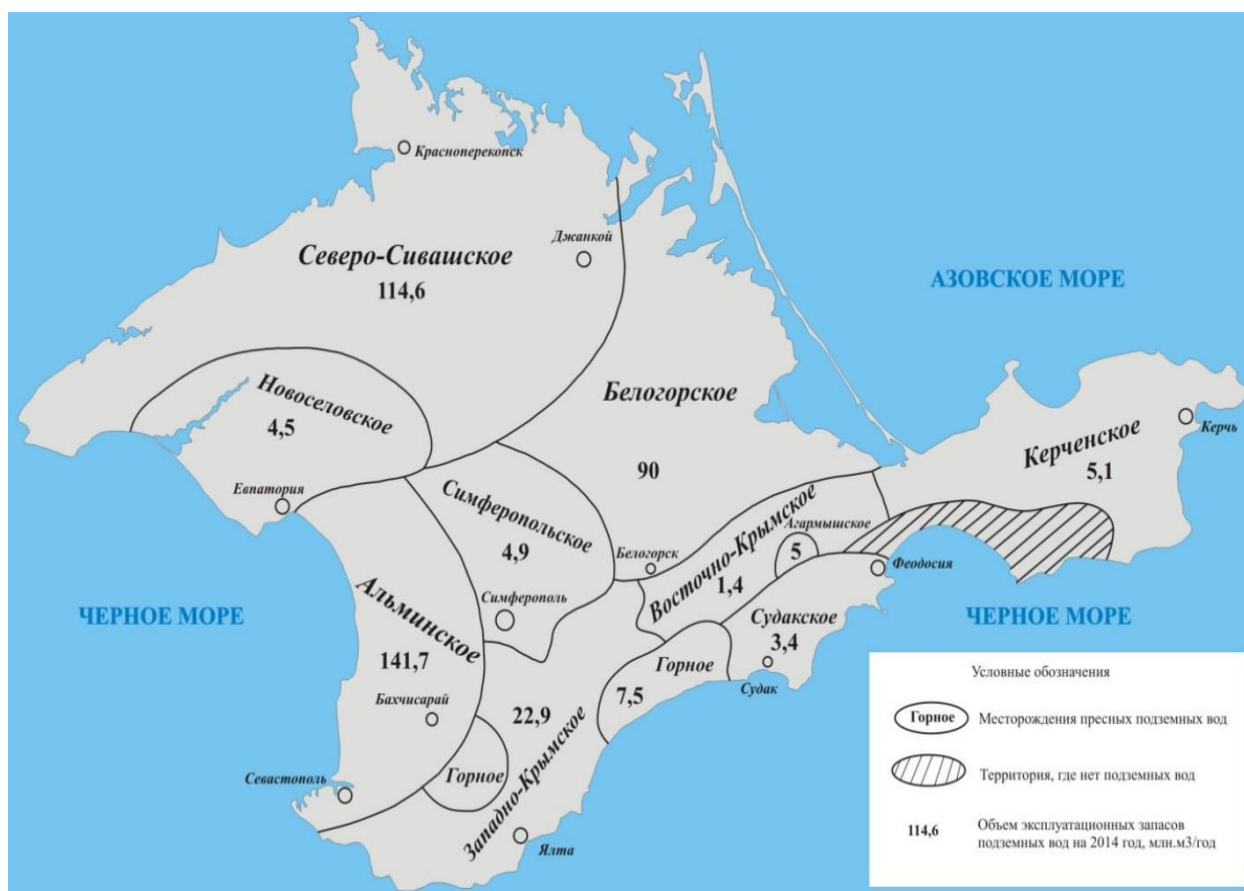


Рис. 2.8. Основные месторождения подземных вод Республики Крым

Для Крыма характерно неравномерное распределение запасов пресных подземных вод. Так, более высокая (>70 тыс. м³/сут.) насыщенность геологических образований пресными водами установлена в Сакском, Джанкойском, Нижнегорском, Красногвардейском, Раздольненском, Бахчисарайском районах. Наибольший водоотбор характерен для Краснопереконского района (99,279 тыс. м³/сут.), Джанкойского района (64,224

тыс. м³/сут.), Сакского района (54,127 тыс.м³/сут), Красногвардейского района (30,742 тыс. м³/сут.), Бахчисарайского района (21,99 тыс. м³/сут.), Красногвардейского района (30,742 тыс. м³/сут.) и Симферопольского района (14,055 тыс. м³/сут.). Незначительные объемы водоотбора (5,288 тыс. м³/сут.) в Ленинском районе. Практически отсутствуют пресные подземные воды на юго-востоке Крыма, вблизи таких городов как Судак, Феодосия и Керчь.

Опреснение морской воды и солоноватых подземных вод для Крыма на данный момент также является приоритетным. В 2017 году в селе Каменка Первомайского района была установлена станция очистки подземных вод. Планируется установка подобных станций в других сёлах степного Крыма.

Однако пока использование опреснённой воды для бытовых нужд, в жилищно-коммунальном хозяйстве Крыма, мягко говоря, не получило широкого применения. Основным направлением является увеличение водозабора пресной воды из скважин. Вопрос о внедрении опреснительных установок производительностью 20 тыс. м³/сут. тоже прорабатывается, рассчитывается экономическая эффективность использования опресненной воды в сельском хозяйстве, в населенных пунктах ЮБК. Это позволит расширить площадь орошаемых земель и улучшить водоснабжение в засушливый период.

Следует отметить, что ситуация с водозабором в Крыму в последние годы быстро меняется. Так, в 2015 году общий объём забора воды составил 253,5 млн м³, в том числе:

- из пресных поверхностных источников – 138,47 млн м³ (55 %),
- подземные воды – 95,13 млн м³ (37 %),
- морская вода – 19,86 млн м³ (8 %).

А к 2022 г. водоснабжение столицы Крыма Симферополя уже практически полностью было переведено на воду из скважин в разных районах Крыма.

Объем Чернореченского водохранилища соответствует стоку реки Черная, и в последние годы его заполнение до начала паводков стало достигать мертвого объема. Это же характерно для ряда других водохранилищ Крыма (Балановское, Загорское и Симферопольское).

Из-за увеличения испаряемости стока реки Салгир в настоящее время недостаточно для заполнения Симферопольского водохранилища.

Объем существующих водохранилищ ЮБК, недостаточен для устойчивого водоснабжения населенных пунктов. В то же время строительство новых водохранилищ там затруднено сейсмическими условиями.

В связи с большим количеством осадков (1000 мм/год), в горных яйлах и с учетом склонов гор хребтов в направлении на Северо-Запада новые водохранилища объемом до 10 млн. м³, следует строить на Северо-Западных склонах Крымских гор.

Глава 3

ПРОЯВЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ В КРЫМУ

3.1. Влияние изменения климата на заполнение водохранилищ

Наполняемость водохранилищ очевидно зависит от гидрометеорологических условий. Причем, не только от количества выпавших осадков, но и от температур воздуха и воды, скорости ветра и других параметров. Анализ индексов засухи и индексов атмосферной циркуляции показывает, что усиление засушливости климата Крыма связано с крупномасштабными изменениями барического поля на юге Европы и в Средиземноморье [7]. Проще говоря, изменение температуры воздуха и выпадения осадков зависит от движения воздушных масс. В этом трудно сомневаться, когда дует холодный северный ветер или сухой и жаркий южный. В наших широтах атмосферная циркуляция определяется циклонами и антициклонами, а это барические образования с характерным размером в тысячи километров. Поэтому вполне естественно, что изменение климата в небольшом регионе типа Крыма будет совпадать с изменением климата в соседних с ним регионах. Так, преобладание антициклонического типа циркуляции в регионе в вегетационный период ведет не только к уменьшению суммы осадков, но и к увеличению испаряемости за счет уменьшения влажности воздуха, к увеличению температуры, скорости ветра, продолжительности солнечного сияния, увеличению радиационного баланса. Со временем это выражается в увеличении повторяемости волн жары и весенне-летней засухи, в усилении засушливости климата.

И действительно, в последние десятилетия наблюдается усиление засухи на юге Европы и в ряде районов юга России. Так, засушливость климата Крыма за последние два десятилетия заметно усилилась. Уже сейчас на 44 % его территории очень засушливые условия, а на 33 % - просто засушливые. Это существенно больше, чем средняя доля пустынь и полупустынь на поверхности суши. По мнению многих ученых, включая научного руководителя Гидрометцентра России Р. Вильфанда, эта засуха вызвана глобальным изменением климата, и она может продолжаться еще десятки лет.

Данные измерений подтверждают эти гипотезы. Так, среднегодовая температура воздуха в Севастополе повысилась с середины 80-х годов более чем на 2 °С, уменьшились запасы влаги в почве, понизился уровень воды в реках, озерах и водохранилищах. С 90-х годов на 7 см в год стал падать уровень Каспийского моря. В Европе с 2017 по 2020 г. продолжалась сильная засуха, одним из последствий которой стали беспрецедентные лесные пожары на юге Европы. Кроме того, там на 50 % увеличилась доля засушливых районов земледелия. Аналогичные явления отмечаются и в Северной Америке в тех же широтах. Это ведет к гибели лесов и урожая сельскохозяйственных культур, осложняется речное судоходство. Как уже отмечалось, в Крыму засуха 2020 г.

была самой сильной за все время наблюдения, что сильно сказалось на заполняемости водохранилищ.

Сильнейшая засуха в Европе была уже в 2003 г. В мае 2011 г. уровень Дуная упал так сильно, что стало невозможным движение судов из-за обмеления русла. В качестве причины этого явления указывалось на отсутствие осадков в Центральной и Восточной Европе в течение трех месяцев. В 2017 г. во всей Южной Европе наблюдалась самая продолжительная за 20 лет засуха, из-за которой потери урожая составили в Италии до 70 %. Причем, не только пшеницы и подсолнечника, но и миндаля. Пересыхали водохранилища и реки. Из-за этой засухи были также многочисленные лесные пожары во Франции, Португалии, Испании. В том же 2017 году была сильная засуха в Ростовской области, заметно понизился уровень Дона. Сопоставление индексов засухи и индекса Северо-Атлантического колебания показывает, что в засуху 2010 г. значение индекса NAO было беспрецедентно низким. В то же время ряд засух, включая засуху 2017–2020 г. приходится на теплые эпизоды индекса Эль-Ниньо.

Результаты компьютерного моделирования изменения климата показывают, что в ближайшем будущем засухи в Европе будут становиться еще сильнее и еще продолжительнее. Это будет связано не только с уменьшением осадков, но и с увеличением испаряемости вследствие повышения температуры воздуха и почвы, а также из-за усиления скорости ветра. Моделирование показало, что повышение температуры на 3 °C приведет к увеличению площади засушливых земель в Европе в два раза, а продолжительности засух – более чем в три раза [9].

В результате в Средиземноморье, климат которого близок к климату Крыма, на засушливые районы будет приходиться половина территории. Ожидается также увеличение здесь количества сухих месяцев в году с 2,1 до 5,6, а в отдельных районах Пиренейского полуострова – до 7 месяцев. Содержание воды в корнеобитаемом двухметровом слое земли, то есть запас доступной растениям влаги, уменьшится при этом на 35 мм. На самом деле такие явления уже фиксировались в Европе, например, летом 2003 г., просто теперь они станут повторяться в два раза чаще.

Многочисленные исследования показывают, что усиление засух за последние два десятилетия характерно не только для всего юга России, но и для юга Европы, включая такие ближайшие к Крыму страны и регионы, как Республика Молдова, Украина, Ростовская область и Краснодарский край. Все это дает основания считать усиление засушливости климата в нашем регионе проявлением определенных глобальных изменений в климатической системе [14].

Это подтверждается и расчетами индексов засухи, в том числе индекса суровости засух Пальмера для разных годов. По оценкам, основанным на результатах моделирования климата по десяткам компьютерных моделей, признанных экспертами международной группы МГЭИК (IPCC), к 2030-м годам, то есть примерно через 10 лет, все северное Причерноморье, включая Крым, уже будет входить в зону опустынивания (рис. 3.1). Обращает на себя внимание не только смещение зоны опустынивания на север в Европе и

Северной Америке до 50° с.ш., но и значительное усиление степени засушливости климата на территории уже существующих аридных зон. Следует отметить, что прогнозируемый в Крыму уровень сухости будет все же гораздо ниже, чем в странах Средиземноморья и Центральной Америки.

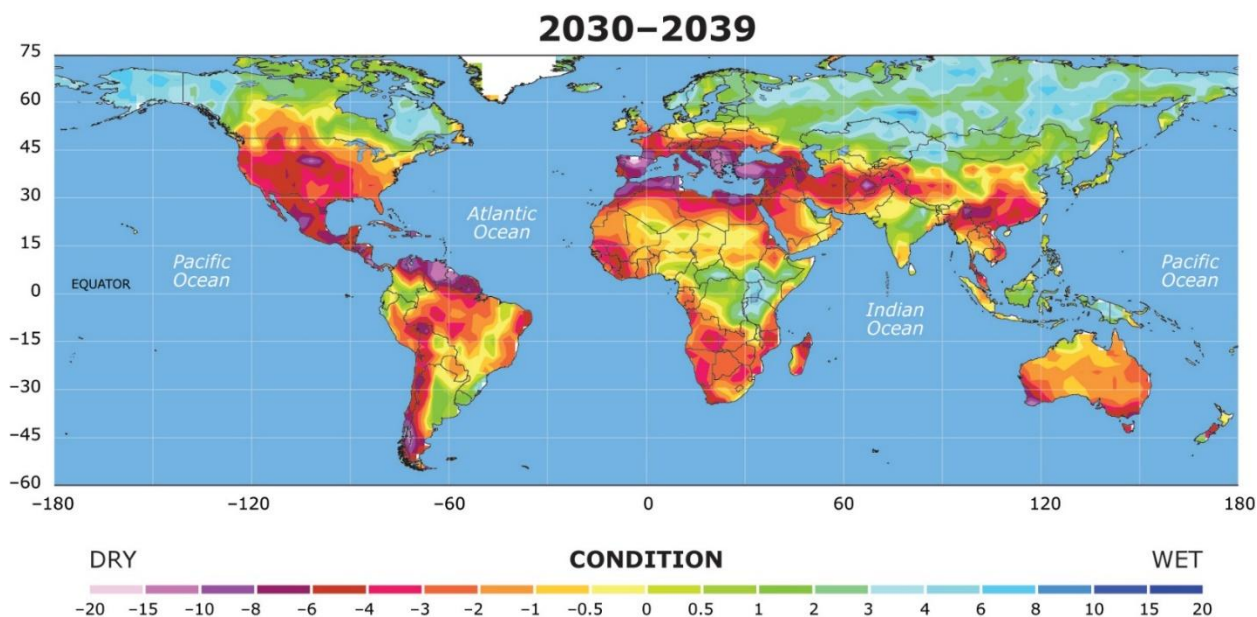


Рис. 3.1. Прогнозная карта среднегодовых значений индекса Пальмера в 2030-2039 годах

Таким образом, одним из возможных объяснений наблюдаемого усиления засушливости климата Крыма и юга Европы является изменение глобальной циркуляции атмосферы (рис. 3.2). В частности, это связано со смещением ячейки Ферреля в умеренных широтах, в результате которого смещается на север пояс высокого давления и связанный с ним пояс пустынь и полупустынь. В северном полушарии зона пустынь и полупустынь расположена между 15° и 45° с.ш., что связано с особенностями общей циркуляции атмосферы. Расчеты по климатическим моделям показывают, что если бы вся поверхность планеты была сушей, то этот пояс пустынь был бы сплошным. На самом же деле он распадается на отдельные пустыни (рис. 3.3). Самая большая из таких пустынь – Сахара, что в переводе с арабского как раз и означает «пустыня». Она находится между 16 и 25° с.ш., то есть вблизи северного тропика. Сравнение с прогнозной картой на рис. 3.1 показывает, что пояс пустынь вследствие глобального изменения климата действительно сместится на север и достигнет Южной Европы.

В свою очередь, смещение климатических поясов может быть обусловлено таянием льдов Арктики, что ведет к сдвигу климатических зон к северному полюсу. Кроме того, происходит также расширение ячейки меридиональной циркуляции в низких широтах (ячейки Хедли). По данным наблюдений со спутников в последние десятилетия оно происходит со скоростью примерно 1 градус широты за 10 лет. Таким образом, за прошедшие 40 лет глобального потепления меридиональное расширение ячейки Хедли

составляет до 4 градусов широты, а значит, пояс высокого давления сдвинулся на север примерно на 450 км.

По данным наблюдений с 80-х годов 20-го века границы климатических зон уже сместились на север на 3 градуса широты. Поэтому через 20-30 лет в нашем регионе прогнозируется климат, характерный для современных пустынь и полупустынь, расположенных в зоне $35^{\circ} - 40^{\circ}$ с.ш.

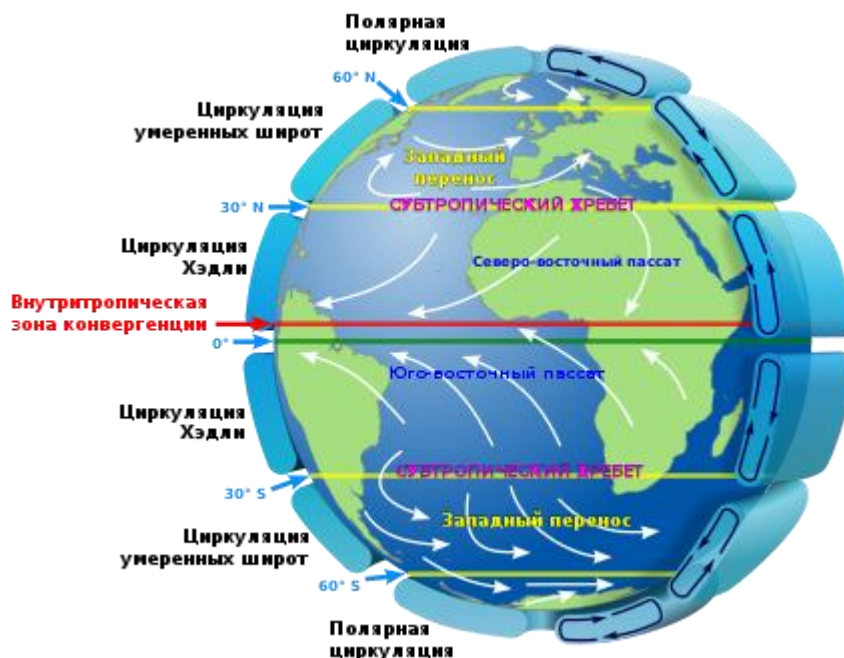


Рис. 3.2. Схема меридиональной циркуляции с ячейками Хедли и Ферреля

Следует отметить, что речь идет именно о прогнозе на ближайшие десятилетия, а не об изменении климата в отдаленном будущем. Более того, анализ публикаций показывает, что процесс усиления засухи в странах Средиземноморья идет уже сейчас. Причем это не просто очередное усиление засухи с последующим скорым ее ослаблением. Исследования ширины годовых колец деревьев, проведенное специалистами из NASA, показало, что засуха в странах Средиземноморья в 1998-2012 гг. была на 50 % сильнее, чем все засухи за последние 500 лет. При этом использовались срезы деревьев из Испании, Италии, Франции, из стран Северной Африки и средиземноморского побережья Ближнего Востока.

Повышение засушливости климата очевидно требует пересмотра требований к водохранилищам. В связи с этим весьма полезным может оказаться опыт стран, расположенных в той зоне, которая на нас «надвигается». В том числе и в части реализации мер по адаптации к изменениям климата, в том числе в системах водоснабжения, в аграрном секторе, в обустройстве парков и курортных зон. К таким мерам относится, в частности, изменение севооборота в засушливые годы, переход на другие сельскохозяйственные культуры. Необходимо, также, на долгосрочной основе увеличивать количество и объемы водохранилищ, ориентируясь на стандарты стран Южной Европы.

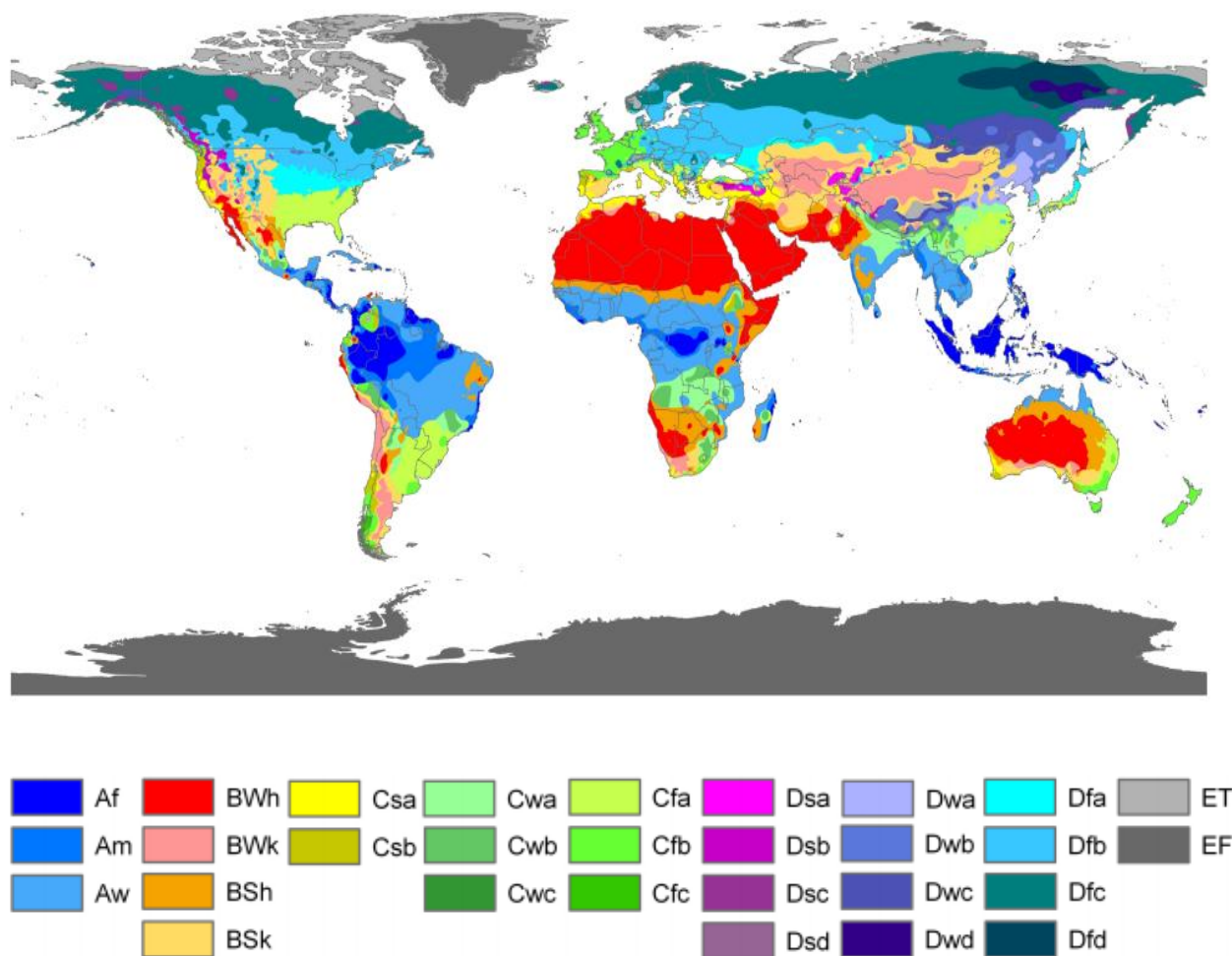


Рис. 3.3. Современная карта климатов по классификации В.П.Кёппена в редакции Треварта

В плане обеспеченности водными ресурсами Крым по сути представляет собой остров площадью 27 тыс. км². Ведь с материка в Крым реки не заходят, а значит можно рассчитывать лишь на собственный водосборный бассейн соответствующей площади. Несложный расчет показывает, что при выпадении в среднем 400 мм осадков приход атмосферной влаги за год превышает 10 км³. При этом полезный объем всех водохранилищ Крыма сейчас менее 0,5 км³, что явно недостаточно. Об этом свидетельствуют и данные о водохранилищах на крупных островах Средиземноморья. Ведь одним из основных последствий современного глобального изменения климата для стран Средиземноморья наряду с повышением температуры является именно усиление засух. И это уже сказывается как на увеличении площади засушливых земель, так и на продолжительности засух. Если сейчас здесь на засушливые территории в среднем приходится менее 30 %, то после глобального потепления на 3°C их площадь по прогнозам составит 50 %.

Например, на Кипре, площадь которого в 3 раза меньше, чем у Крыма, давно используют опреснители. Однако местные власти считают, что это дорого и сразу после лета, когда проходят сильные дожди, переходят на воду из водохранилищ. Причем водохранилищ там больше сотни, а объем самого

большого 115 млн м³, что почти вдвое превышает объем самого большого в Крыму Чернореченского водохранилища. Другой пример – итальянский остров Сардиния, площадь которого чуть меньше площади Крыма, а суммарный объем водохранилищ в 5 раз больше, чем в Крыму. При этом средний объем водохранилищ на Сардинии составляет 57 млн м³, то есть заметно больше, чем в Крыму. Тем не менее население там вдвое меньше, чем в Крыму.

Наиболее сложная ситуация в странах, где наряду с высоким значением индекса засухи не хватает водных ресурсов. Среди 33 стран мира с наибольшим дефицитом воды в 2040 г. 13 стран (а это более трети) из бассейна Средиземного моря. Среди них Сан-Марино, Палестина, Израиль, Иордания, Ливия, Македония, Марокко, Сирия, Турция, Греция, Алжир, Испания и Тунис. Причем здесь они перечислены в порядке убывания дефицита водных ресурсов. Обращает на себя внимание тот факт, что в этом списке много стран из Восточного Средиземноморья, расположенных сравнительно недалеко от Крыма. По всей видимости данная закономерность связана с тем, что в Европе речной сток уменьшается с севера на юг и с запада на восток, так что наиболее сложная ситуация в этом плане как раз в Восточном Средиземноморье.

Засуха была одной из причин «арабской весны» в Тунисе, Ливии, Египте и в ряде других стран региона. В частности, сильная засуха в Сирии в 2006-2011 гг. привела к нехватке воды и плохим урожаям на протяжении нескольких лет, что привело к дефициту продуктов, безработице и росту социальной напряженности. Как известно, в последующем это привело к гражданской войне и миграции населения из Сирии.

Сильнейшая за 150 лет засуха была в Испании в 2014 г., когда страна была близка к полному исчерпанию ресурсов питьевой воды. Помимо дефицита воды среди опасных последствий засух в Средиземноморье можно отметить лесные пожары, значительный перерасход электроэнергии на кондиционирование помещений и гибель людей. Так, за аномально жаркое лето 2003 г. в Европе от жары погибло 70 тыс. человек, при этом за один только август во Франции – 15 тысяч человек. В последние годы засухи привели также к многочисленным пожарам в странах южной Европы, горели леса Франции, Испании и Португалии.

По прогнозам климатологов, продолжительность периодов жары на юге Европы будет увеличиваться и к концу столетия они станут на 2 месяца продолжительнее. По оценкам Института им. Макса Планка в странах Ближнего Востока уже к 2050 г. температура летом даже ночью не будет опускаться ниже 30 °С, а в полдень будет достигать 46 °С. В связи с этим к 2050 г. число климатических беженцев в мире достигнет 250 млн. человек.

Особенно сильно засухи в Средиземноморье влияют на сельское хозяйство. В течение трехлетней засухи в 2017 - 2020 гг. от нее погибло от 50 до 70 % урожая оливок и винограда, что привело к росту цен на оливковое масло в январе 2021 г. в Италии на 44 % по сравнению с предыдущим годом. Соответствующий ущерб только в Италии оценивается в 2 млрд. евро. А Италия и Испания — основные производители оливок. Большой урон засухи

наносят и виноградникам на юге Европы. По сути сельскохозяйственные земли юга Европы на глазах превращаются в зону рискованного земледелия (Rodrigo-Comino et al., 2021).

Усиление засухи в регионе ведет также к изменению стока рек и, соответственно, режима наполнения водохранилищ. В бассейнах рек Средиземноморья из-за уменьшения продолжительности зимы и повышения температуры слабее становятся весенние паводки. С другой стороны, в связи с повышением температуры воды в Средиземном море усиливается роль средиземноморских циклонов в увеличении летних осадков. Строительство новых и реконструкция действующих водохранилищ – один из путей борьбы с дефицитом воды из-за неравномерности выпадения осадков.

3.2. Изменение температуры воздуха и воды

Обычно засухи связывают с высокой температурой, то есть волнами жары. Однако, это хотя и связанные, но разные явления. Суровость почвенной засухи как правило определяется не температурой воздуха или почвы, а длительностью засухи. Так, к сильным засухам относят ситуации, когда без перерыва отмечаются более четырех сухих декад подряд. И если по повышению максимальной температуры воздуха страны Средиземноморья практически не выделяются среди других стран материковой Европы (рис. 3.4), то по увеличению продолжительности засух – сильно выделяются.



Рис. 3.4. Прогнозируемое увеличение максимальной температуры и продолжительности засух к 2040 г. в Европе

Для сравнения на рис. 3.5 приведена аналогичная карта для Ближнего Востока и Северной Африки, из которой видно, что в странах Северной Африки повышение максимальных температур в самые жаркие дни существенно меньше, тогда как страны Средиземноморья также попадают в зону усиления засух. Именно наложение волн жары на засуху становится характерным для этого региона. При этом с одной стороны повышается испаряемость, что усиливает засуху, а с другой – дефицит влаги не позволяет понизить высокую температуру за счет испарения и транспирации.

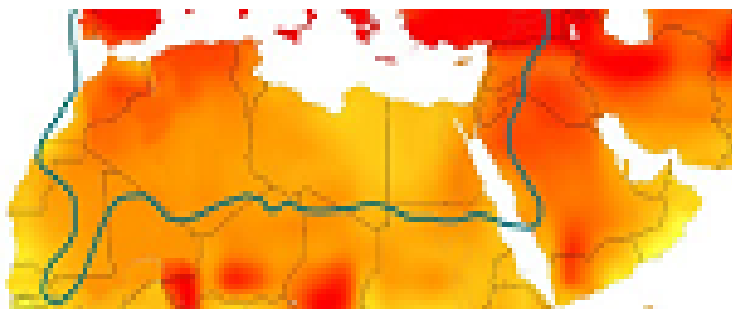


Рис. 3.5. Прогнозируемое увеличение максимальной температуры и длительности засух к 2040 г. на Ближнем Востоке и в Северной Африке

В Средиземноморье этот эффект может в отдельные годы усиливаться во время квазипериодических изменений температуры поверхности океана типа явления Эль-Ниньо. Последние два эпизода Эль-Ниньо, разделенные событием Ла-Ниньо, были в 2015–2016 гг. и 2018–2020 гг. То есть последние три года засухи вполне могут быть связаны с этими последними годами с Эль-Ниньо. Тогда за ними последует период ослабления засушливых явлений и аномально высоких температур продолжительностью несколько лет. По данным наблюдений теплый эпизод Эль-Ниньо закончился в первом полугодии 2020 г., после чего имел место холодный эпизод, то есть явление Ла-Ниньо (табл. 3.1). Тем не менее, современное усиление засух в Крыму и на юге Украины (Одесская, Херсонская и Николаевская области) связывают именно со смещением климатических зон. Данные о температуре воздуха в конкретных населенных пунктах в последние годы доступны на сайте [12].

В то же время по данным о температуре воды в верхнем слое Черного моря сравнительно небольшой тренд глобального потепления после 1980 г. проявляется на фоне очень значительной межгодовой изменчивости (рис. 3.6), которая отчасти связана с явлением Эль-Ниньо (табл. 3.1).

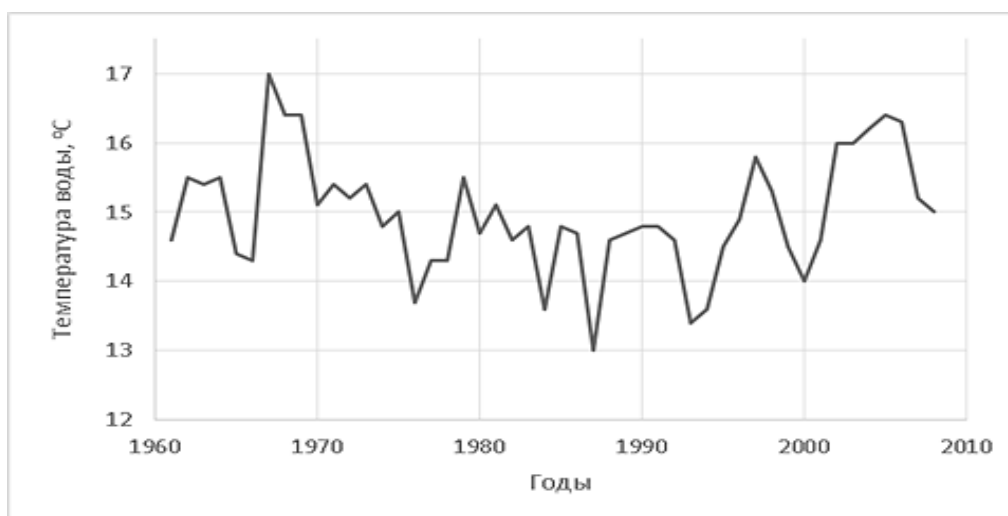


Рис. 3.6. Изменение средней температуры поверхностных вод в Черном море по данным прибрежных измерений

Таблица 3.1

Значения средних за 3 месяца аномалий температуры воды океана в районе проявления явления Эль-Ниньо в Тихом океане

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2

На рис. 3.7 представлена аномалия приземной температуры воздуха с января по сентябрь 2021 года по отношению к климатической норме, рассчитанной для этого периода с учетом данных за 1981–2010 г.г. Здесь уже рядом с Крымом выделяется не Средиземноморье, а север Африки и Ближний Восток, включая Кавказ и побережье Каспийского моря.

Отсюда видно, что изменение среднегодовой температуры при современном изменении климата может существенно отличаться от сезонных температур. Это хорошо видно и при анализе данных, сглаженных скользящим средним. Такая процедура позволяет лучше выделить тренд климатических изменений на фоне межгодовых колебаний температуры. На рис. 3.8 приведен график аномалии среднегодовой температуры в районе Южного берега Крыма после сглаживания ряда скользящим средним с периодом 11 лет. В этом случае за норму принималось среднее значение температуры для опорного периода с 1961 по 1990 года.

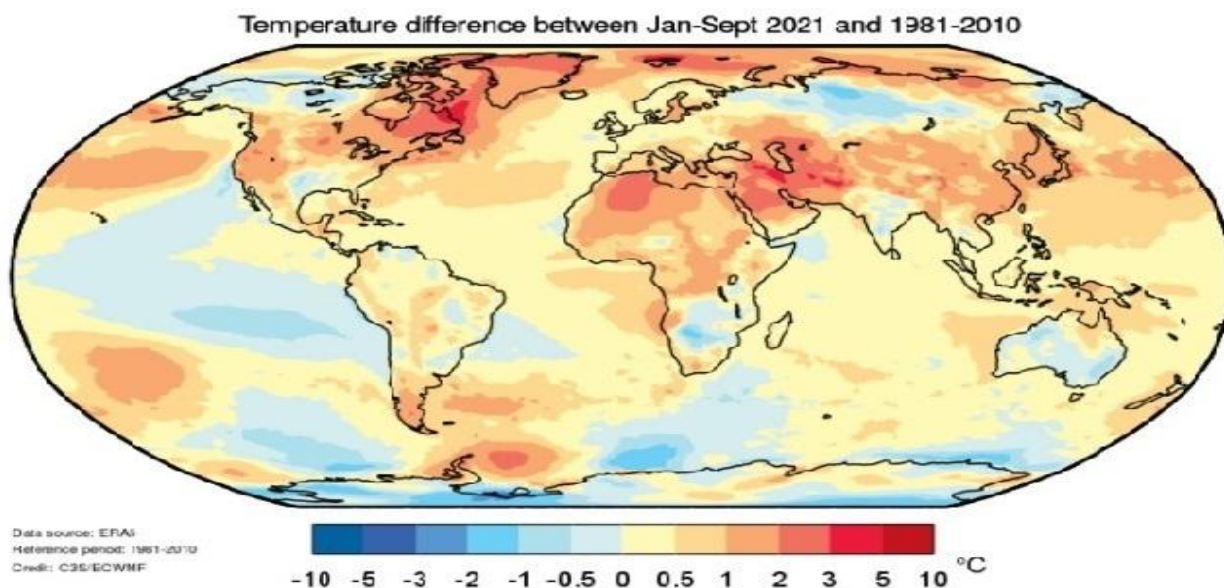


Рис. 3.7. Разница приземных температур воздуха с января по сентябрь 2021 года по отношению к среднему значению в 1981–2010 годы

На рис. 3.9 – аналогичные графики для четырех сезонов. Из рис. 3.9 видно, что наибольшие темпы роста температуры характерны для лета. В свою очередь для осеннего периода характерно замедление темпов потепления после 2006 г. Для зимы и весны при этом темпы потепления начиная с 1990-х годов существенно меньше, чем летом и осенью.



Рис. 3.8. Сглаженные (скользящее осреднение с периодом 11 лет) аномалии средней годовой температуры воздуха по метеостанциям Южного берега Крыма

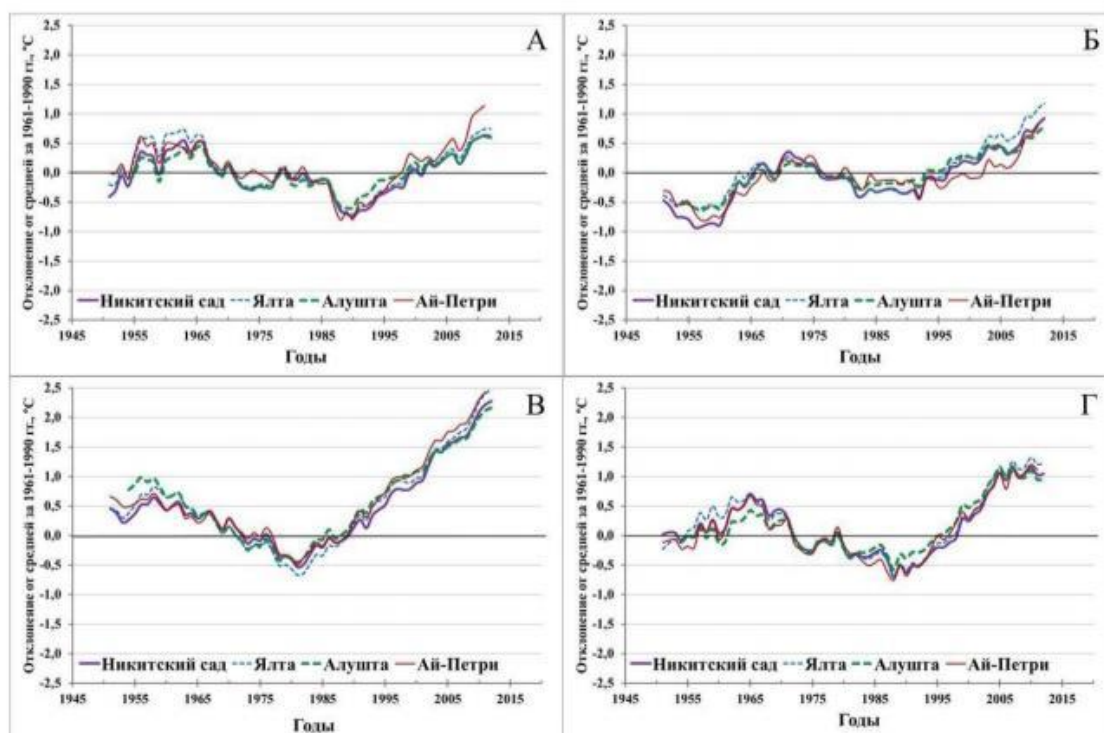


Рис. 3.9. Сглаженные аномалии средней сезонной температуры воздуха по метеостанциям Южного берега Крыма (А – зима; Б – весна; В – лето; Г – осень)

Еще более убедительно разница в темпах потепления видна из графика для линейных трендов изменения среднемесячных температур (рис. 3.10). Хорошо видно, что январские и летние температуры в Крыму увеличивались, а февральские, весенние и осенние – вообще уменьшались (этому соответствуют отрицательные значения коэффициента b). При этом темпы изменения среднегодовой температуры были на порядок меньше, чем сезонных температур. Оценка трендов для периода 1980-1999 годов показала, что потепление значимо в Севастополе во все летние месяцы даже при уровне доверия 95 %, в Ялте оно значимо летом при уровнях доверия 80-90 %, а в Феодосии значимым оказался только тренд похолодания в декабре. В июле тренд потепления в отдельные месяцы за этот период достигал в Севастополе $1.75^{\circ}\text{C} / 10$ лет, а тренд похолодания в Феодосии -1.63°C за 10 лет. Анализ данных по температуре воды показал, что максимальные тренды также приходятся на летние месяцы. Для июля и августа тренды, как правило, значимы при уровне доверия 90 %.

Согласно прогнозам, приведенным в Пятом оценочном докладе МГЭИК, в большинстве регионов будет больше аномально жарких периодов и меньше дней с сильными морозами. Но при этом вовсе не исключаются и аномально низкие температуры. Следует отметить, что именно этот показатель (абсолютный минимум температуры) сильно отличается в разных регионах Крыма. Самые низкие температуры, отмеченные за все время наблюдений, составляет для Крыма – 36°C , для Севастополя – 24°C , для Ялты – 18°C . При этом расстояние от Ялты до Севастополя – 80 км.

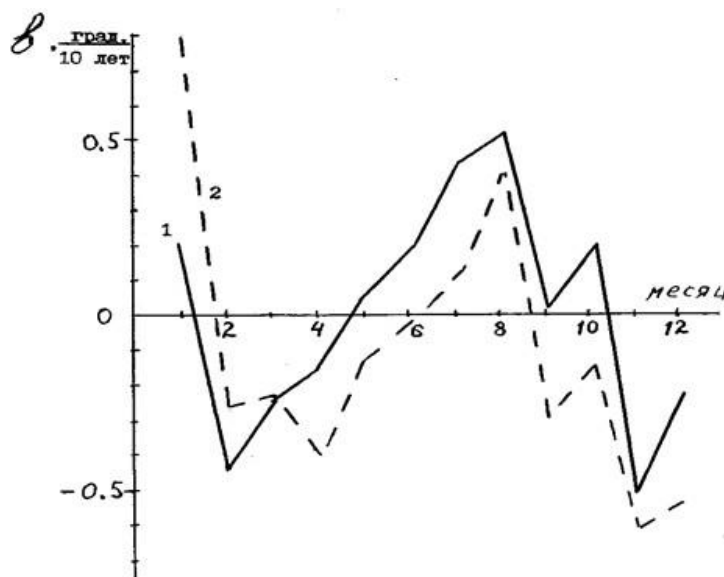


Рис. 3.10. Линейные тренды изменения среднемесячных температур за период 1970 – 2000 г.г.: 1 - в Севастополе, 2 - в Феодосии

В России одним из главных последствий потепления является увеличение в разы частоты повторяемости опасных гидрометеорологических явлений. Так, для севера Евразии уже к 2050 г. прогнозируется увеличение повторяемости аномальных температур и осадков в 2-4 раза. Это означает, что если в 1990-х годах подобные аномалии случались раз в 20 лет, то к 2050 г., они будут происходить уже раз в 5–10 лет. К таким явлениям относятся, например, сильные паводки и волны жары. Такого рода аномально высокие температуры наблюдались летом 2010 г.

Интересно, что причиной жары в Европейской части России летом 2010 г. был обширный антициклон, который четко выделяется по беспрецедентному значению индекса Северо-Атлантического колебания (North Atlantic Oscillation, т.е. NAO). Его среднегодовые значения приведены на рис. 3.11. Более того, для всех месяцев этого года кроме июля среднемесячные значения индекса NAO были отрицательными.

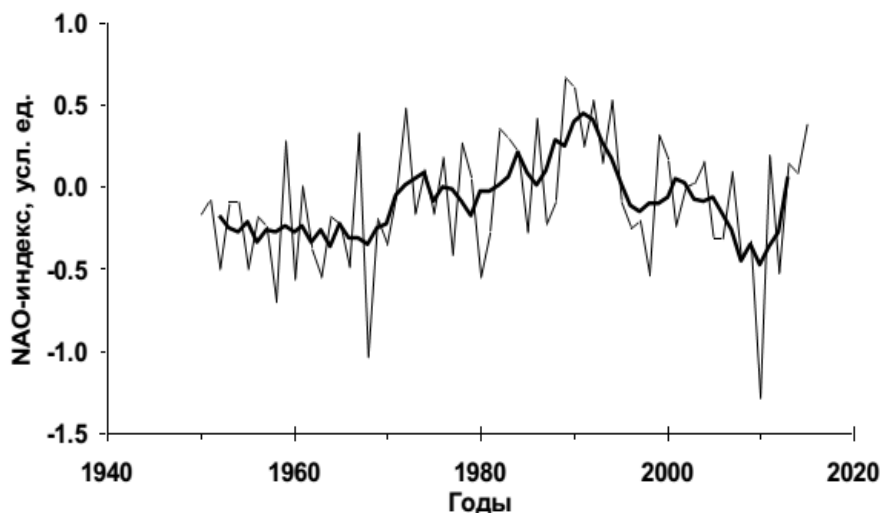


Рис. 3.11. Изменение среднегодовых значений индекса NAO с 1950 г.

Косвенно о повышении температуры воды в океане свидетельствуют также данные о повышении уровня океана. Динамика глобального среднего уровня моря с января 1993 года по сентябрь 2021 года приведена на рис. 3.12. Это изменение связано как с таянием льдов, так и с тепловым расширением воды. При коэффициенте объемного расширения океанической воды стандартной солености при температуре 10°C $1,5 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$, повышение температуры океана на 2 градуса ведет к увеличению водной толщи океана на 0,03 %. Для средней глубины океана 4000 м это соответствует подъему уровня на 1,2 м. По состоянию на сентябрь 2021 г. уровень океана поднимается в среднем на 4,4 мм в год.

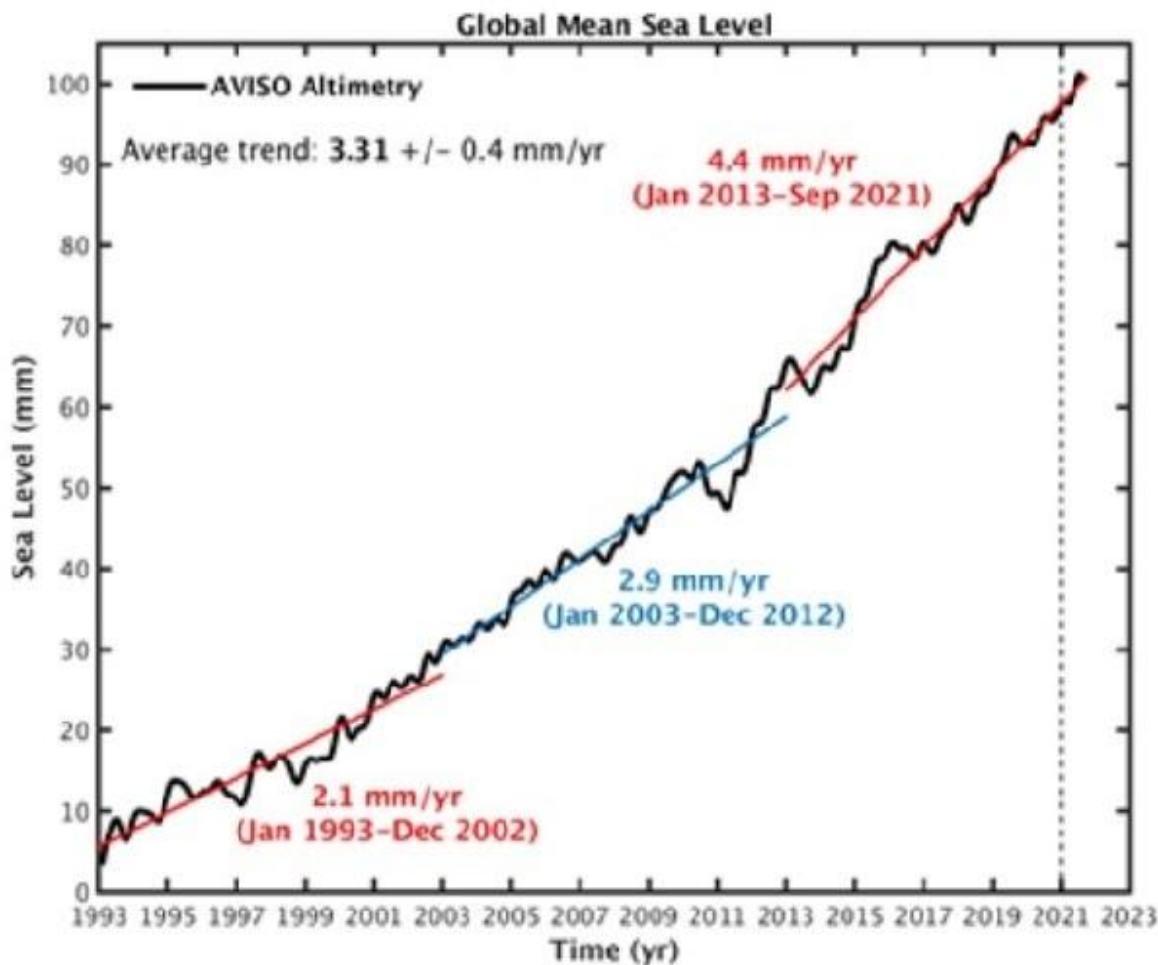


Рис. 3.12. Динамика глобального среднего уровня моря с января 1993 года по сентябрь 2021 года

3.3. Изменение количества осадков

Распределение осадков в Крыму очень неравномерное несмотря на сравнительно небольшую территорию полуострова. Если в степной зоне выпадает обычно менее 300 мм в год, то в Крымских горах – около 1000 мм. Именно поэтому основные реки Крыма берут начало в горах Крыма. Это Салгир, Альма, Кача, Бельбек, река Черная и другие.

Речной сток в Крыму составляет за год в среднем $0,4 \text{ км}^3$, что составляет всего 4 % от выпадающих в водосборном бассейне осадков. Это свидетельствует о слабом поверхностном стоке и большом значении подземных вод в Крыму. Однако из артезианских скважин, которых в Крыму более трех тысяч, пока удается получать за год только те же $0,4 \text{ км}^3$.

Осадки в Крым приносят, в основном, атлантические циклоны. Поэтому их выпадение зависит от интенсивности западного переноса воздушных масс и шторм-треков, то есть путей перемещения этих циклонов. В свою очередь, этот перенос характеризуется значением индекса Северо-Атлантического колебания, о котором уже упоминалось выше. Когда значение индекса NAO велико и больше нуля – западный перенос усиливается, но атлантические циклоны тогда проходят над Европой севернее Крыма. При отрицательных значениях – западный перенос ослабевает, но циклоны при этом идут по югу Европы и Средиземноморью, а значит, несут осадки и в Крым. Отсюда сразу следует, что при отрицательных значениях индекса NAO в основных регионах Европейской части России будет мало осадков, но на Крым эта засуха не распространяется.

Это подтверждается данными по среднемесячным и среднегодовым значениям индекса NAO для той же засухи 2010 г. Соответствующие данные измерений доступны на сайтах университетов Великобритании. В табл. 3.2 они приведены для периода с 1987 по 2020 г., то есть с года начала широкомасштабных исследований современного изменения климата.

Из табл. 3.2 видно, что в 2010 г. было беспрецедентно большое по модулю отрицательное значение среднегодового индекса NAO – минус 2,35. Причем столь низкого значения этого индекса не было с 1950 г. (рис. 3.11). Более того, анализ всего имеющегося архива данных, начиная с 1825 г., показал, что вообще за весь период наблюдений данный индекс никогда (не превышал по модулю значения 2 за исключением 2010 г. И только один раз индекс NAO превысил 1,5, это было в 1868 г., но тогда он был положительным (+1,58). Отрицательное же значение, превышающее по модулю 1, было до этого за всю историю измерений тоже только один раз – в 1996 г. оно составило -1,01. Аномальность циркуляции атмосферы в 2010 г. подтверждает и тот факт, что для всех месяцев этого года кроме июля тогда среднемесячные значения индекса NAO были отрицательными (табл. 3.2).

При значительном расходе воды водохранилищ на орошение помимо месячных сумм осадков большое значение имеют сезонные значения коэффициента влагообеспеченности. Под ним в простейшем случае понимается просто отношение осадков к испаряемости. Однако, с учетом запаса влаги в почве в начале вегетационного периода, правильнее сначала суммировать осадки с запасом влаги, а уже потом делить на испаряемость. Именно так рассчитывался коэффициент влагообеспеченности ниже.

Таблица 3.2

Среднемесячные значения индекса NAO за период глобального потепления

год\мес.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	за год
1987	-2.12	-0.24	0.29	2.59	-0.81	-0.58	-1.25	-2.99	1.27	-0.80	-0.67	-0.81	-0.51
1988	0.53	-0.11	0.78	-2.39	-1.24	-2.75	1.46	0.73	0.80	-2.02	-1.47	1.85	-0.32
1989	3.53	3.61	2.45	-0.48	1.16	-0.53	0.58	1.76	-0.96	0.88	-2.97	-2.23	0.57
1990	3.50	5.11	3.11	1.77	-1.19	0.42	1.43	3.31	-0.99	-0.59	-1.48	0.34	1.23
1991	1.87	-0.02	-1.37	1.48	-0.04	-0.31	-0.28	2.71	-1.12	-1.77	1.68	1.24	0.34
1992	0.64	3.18	1.66	1.32	0.79	-1.74	1.04	3.97	0.99	-3.33	4.52	0.21	1.11
1993	3.91	0.11	1.47	0.83	-2.59	0.16	0.64	0.75	-2.60	-4.13	0.77	2.17	0.12
1994	1.28	0.07	3.68	1.38	-1.43	2.98	-0.09	-1.59	-2.85	-1.88	1.68	2.86	0.51
1995	2.70	3.13	1.06	-1.81	-0.36	-3.36	-0.96	-1.33	-1.55	1.22	-2.73	-3.33	-0.61
1996	-3.27	-0.12	-2.57	-0.31	-1.50	1.43	1.47	-0.19	-2.23	-0.07	-0.05	-4.70	-1.01
1997	-1.95	5.26	2.09	-0.97	-1.35	-4.05	1.18	1.78	-0.67	-2.26	-0.99	-0.20	-0.18
1998	-0.28	2.44	1.24	-0.39	-1.26	-0.85	-0.57	1.80	-3.48	1.34	1.13	1.95	0.25
1999	0.90	1.80	-0.72	0.43	1.03	1.39	-1.85	-3.67	-0.51	-0.69	0.30	2.13	0.04
2000	0.35	4.37	0.54	-3.34	0.31	0.89	-2.99	0.78	-1.10	1.37	-0.24	-1.41	-0.04
2001	0.02	0.07	-0.68	1.24	-0.09	-1.33	-1.12	1.64	-3.83	0.88	0.01	-2.25	-0.45
2002	2.31	3.01	0.09	0.91	-0.05	0.90	-0.71	-0.61	-3.58	-1.50	-0.27	-0.98	-0.04
2003	0.15	1.34	1.08	-1.74	1.17	-0.86	0.09	-0.99	0.35	-3.68	0.31	-0.85	-0.30
2004	0.20	-1.23	1.07	1.08	-0.67	-0.38	-0.30	-0.76	2.51	-2.18	-0.55	1.27	0.01
2005	1.82	-2.25	-1.29	0.71	-0.13	-1.00	-0.08	0.94	0.50	-0.45	-1.01	-0.81	-0.26
2006	-0.10	-1.24	-1.12	0.57	-0.22	-0.41	0.83	-2.47	-1.02	-1.97	2.00	3.03	-0.18
2007	1.76	0.42	2.03	-0.10	0.62	-3.34	-1.05	-3.41	-1.18	-0.02	-1.67	1.36	-0.38
2008	1.85	1.79	0.37	-2.02	-3.26	-1.62	-1.13	-0.21	-2.07	0.01	-1.30	-0.58	-0.68
2009	0.60	-1.43	0.15	1.74	1.52	-3.05	-0.92	1.07	-0.63	-1.53	1.68	-3.73	-0.38
2010	-2.38	-3.92	-0.80	-1.03	-1.66	-3.65	0.06	-2.01	-2.38	-2.41	-3.34	-4.61	-2.35
2011	-1.38	2.79	-0.17	2.39	1.08	-1.58	-3.39	-2.41	2.97	1.31	0.74	3.20	0.46
2012	2.05	1.28	1.78	-2.36	-0.83	-2.58	-1.31	-0.44	-1.44	-3.21	-1.11	0.60	-0.63
2013	1.08	-0.26	-3.75	0.03	1.23	1.40	2.52	2.16	-0.57	-0.36	0.04	3.54	0.59
2014	0.71	2.32	1.64	0.84	-0.08	-1.98	0.91	-1.14	-2.10	0.31	-2.17	1.89	0.10
2015	2.81	1.47	1.99	1.03	2.09	0.28	-2.16	1.47	-1.65	-1.13	3.54	4.22	1.16
2016	1.17	1.61	0.33	-2.06	-0.83	-1.27	2.19	2.14	2.45	-1.47	-1.61	2.10	0.39
2017	0.17	1.38	1.05	1.50	0.38	-0.55	0.10	-0.04	1.42	1.36	-0.90	1.00	0.57
2018	1.82	-0.10	-1.12	2.37	2.01	-1.40	3.83	1.26	0.45	-1.17	-1.28	1.93	0.72
2019	-0.36	1.90	2.39	1.70	2.05	-2.82	-2.79	0.10	-0.32	-1.11	-1.84	0.74	-0.03
2020	3.11	4.70	0.36	-0.71	-0.09	-1.52	-1.23	-1.36	0.49	-0.19	1.25	-0.78	0.34

В зонах рискованного земледелия, например, в Саратовской области, ущерб от засухи для зерновых культур обычно связан с сильной межгодовой изменчивостью суммы осадков, особенно выпадающих в период весенне-летней вегетации (табл. 3.3). Из таблицы видно, что если весенний запас влаги в почве менялся в интервале 60 – 132 мм, то количество осадков – от 17 до 93 мм [9]. То есть это вполне сопоставимые величины.

В отличие от Саратовской области в Крыму интенсивное испарение начинается уже в апреле, поэтому весенний запас влаги оценивают по состоянию на 1 апреля. В табл. 3.4 приведены запасы влаги в метровом слое почвы в Ленинском районе республики Крым по состоянию на 1 апреля и 1 июля под различными сельскохозяйственными культурами на неорошаемых землях.

Таблица 3.3

Межгодовая изменчивость влагообеспеченности почвы в мае-июне в Саратове

Год	Весенний запас влаги, мм	Осадки в мае-июне	Всего влаги, мм	Испаряемость, мм	Коеф. влаго- обеспеченности
1891	60	18	78	310	0,25
1906	132	93	225	337	0,66
1911	97	69	166	255	0,65
1921	72	39	111	373	0,30
1939	96	66	162	278	0,58
1948	130	17	147	334	0,44
1954	69	83	152	275	0,55
1957	124	20	144	408	0,35
1969	67	38	105	239	0,44
1972	70	21	91	355	0,26

Таблица 3.4

Изменение влагообеспеченности почвы в Крыму с апреля по июль

Культура	Запас влаги на 1.04.2017 г., мм	Запас влаги на 1.07.2017 г., мм
Пшеница после пара	53	1
Пшеница после гороха	45	45
Озимый ячмень	71	71
Подсолнечник	59	0
Лен	65	7

Из табл. 3.4 видно, что под пшеницей после пара, подсолнечником и льном запасы влаги в метровом слое почвы были практически полностью истощены к началу июля. Хорошо видно, также, преимущество озимых культур, успевающих пройти основные стадии вегетации еще при достаточном количестве влаги в почве.

Месячные и годовые суммы осадков по данной гидрометеостанции «Херсонесский маяк» под Севастополем за период с 2017 по 2020 гг. представлены в табл. 3.5. В среднем за эти четыре года минимум приходится на август, причем два года в августе вообще не выпало даже миллиметра осадков. За апрель-май при этом выпадает в среднем 94 мм осадков, что лишь немного превышает запасы почвенной влаги в метровом слое. А с учетом толщины корнеобитаемого слоя 2 м выпавшие за эти три месяца осадки не могут компенсировать истощение запасов влаги в земле. Максимум осадков при этом приходится, как это ни странно, на июнь. После этого уровень воды в Чернореченском водохранилище как раз и начинает падать (рис.2.1). Накопление же воды в зимний период связано с меньшей испаряемостью.

Таблица 3.5

Месячные и годовые суммы выпавших осадков (мм) в г. Севастополе

Год	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	за год
2017	54	24	45	37	51	30	20	35	1	50	38	36	421
2018	30	40	26	2	42	13	66	0	76	50	39	69	454
2019	34	26	10	31	3	92	53	13	11	14	42	39	369
2020	16	37	4	9	10	56	3	0	21	26	67	22	272
Суммарно	134	127	85	79	106	191	142	48	109	140	186	166	1516

Таким образом, засушливое лето в Севастополе как бы делится июнем на две части – в конце мая растительность высыхает и в конце июня опять оживает, но уже ненадолго. В августе засуха возобновляется.

В табл. 3.6 представлены месячные и годовые суммы выпавших осадков на Ай-Петри, то есть в горах, на высоте более 1100 м над уровнем моря. Там максимум осадков приходится на декабрь-январь, а минимум – на апрель. А годовые суммы осадков на протяжении 10 лет меняются от 530 до 1260 мм, в 2,5 раза.

Таблица 3.6

Месячные и годовые суммы выпавших осадков (в мм) на Ай-Петри

Год	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	за год
2011	82	41	30	119	94	88	24	3	13	106	15	128	743
2012	188	43	49	37	58	17	54	155	10	37	46	154	848
2013	121	61	110	43	45	84	84	56	155	88	43	30	920
2014	138	97	48	27	33	102	35	14	127	33	55	144	853
2015	90	120	109	54	96	76	19	17	28	177	141	23	950
2016	172	80	51	64	51	74	50	172	7	89	67	168	1045
2017	153	31	67	56	115	38	52	44	3	80	111	104	854
2018	130	128	140	5	33	65	236	17	190	47	87	185	1264
2019	201	36	11	74	3	26	98	42	19	29	125	97	760
2020	50	146	8	18	56	52	49	5	35	33	36	46	533
Суммарно	1325	783	623	497	584	622	701	525	587	719	726	1079	8770

Среди рассмотренных городов Крыма наименьшая среднегодовая сумма осадков выпадает в Керчи (табл. 3.7). Там четко выделяется два сезонных максимума осадков – в январе и в июне. При этом минимум – в августе, как и в Севастополе.

Для Симферополя в последние годы характерен максимум осадков в июне и два хорошо выраженных минимума – в марте и в ноябре (табл. 3.8). Годовая сумма осадков здесь заметно больше, чем в Севастополе.

Таблица 3.7

Месячные и годовые суммы выпавших осадков (в мм) в г. Керчь

Год	Янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	за год
2011	28	15	9	48	10	33	0.3	32	18	56	14	60	323
2012	61	19	16	21	45	38	8	14	1	0.8	15	33	271
2013	31	28	40	10	27	45	66	17	45	55	10	17	389
2014	59	6	15	9	11	104	14	0.0	17	15	2	39	291
2015	58	24	25	67	12	95	12	16	2	33	47	20	410
2016	60	34	23	11	43	54	25	6	39	16	30	37	378
2017	47	17	32	61	39	10	24	14	23	28	38	28	361
2018	34	25	46	8	6	39	46	0.6	58	34	42	52	390
2019	70	25	20	17	32	7	38	27	5	7	24	38	309
2020	13	51	1	16	32	7	13	14	22	28	21	21	238
Суммарно	461	244	227	268	257	432	246	140	230	272	243	345	3360

Тем не менее, сравнение отдельно взятого 2021 г. для периода с января по сентябрь с климатической нормой для 1951 – 2000 гг. дает для Крыма даже увеличение суммы осадков на 100 мм, а для Краснодарского края – и на 300 мм (рис. 3.13). На это указывают голубой и синий цвета раскраски, в свою очередь коричневый цвет на юге Европы и в районе Каспийского моря соответствует уменьшению суммы осадков. Хотя за 2020 г. соответствующая сумма осадков была, как отмечалось выше, меньше нормы. Об этом свидетельствуют и данные таблиц 3.5 – 3.8. Так, весной 2020 г. В Крыму выпало только 25 % осадков от климатической нормы, а в Краснодарском крае – 42 %. Таким образом, наряду с большой пространственной неоднородностью выпадения осадков и значительной сезонной изменчивостью, для Крыма характерна существенная межгодовая изменчивость сумм осадков. Причем она была большой и до начала глобального потепления (табл. 3.9). Помимо климатических норм для месячных и годовых сумм там указаны также их минимумы и максимумы.

Таблица 3.8

Месячные и годовые суммы выпавших осадков (в мм) в г. Симферополь

Год	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	за год
2011	39	11	9	59	45	77	0.1	15	22	69	6	42	393
2012	48	29	29	15	38	4	28	62	3	13	14	38	321
2013	53	23	48	26	2	51	110	17	60	110	14	18	533
2014	71	11	22	13	18	93	18	11	45	29	18	58	407
2015	64	53	46	37	121	126	38	15	2	56	50	14	622
2016	49	39	31	58	99	68	37	26	6	33	43	86	575
2017	46	36	33	72	73	58	54	19	0.9	54	45	39	529
2018	30	52	32	4	35	11	96	0.0	82	39	35	103	518
2019	70	28	17	34	13	71	21	33	14	18	47	44	408
2020	20	40	5	17	53	31	54	35	51	22	20	22	368
Суммарно	490	322	272	335	497	590	456	233	285	443	292	464	4674

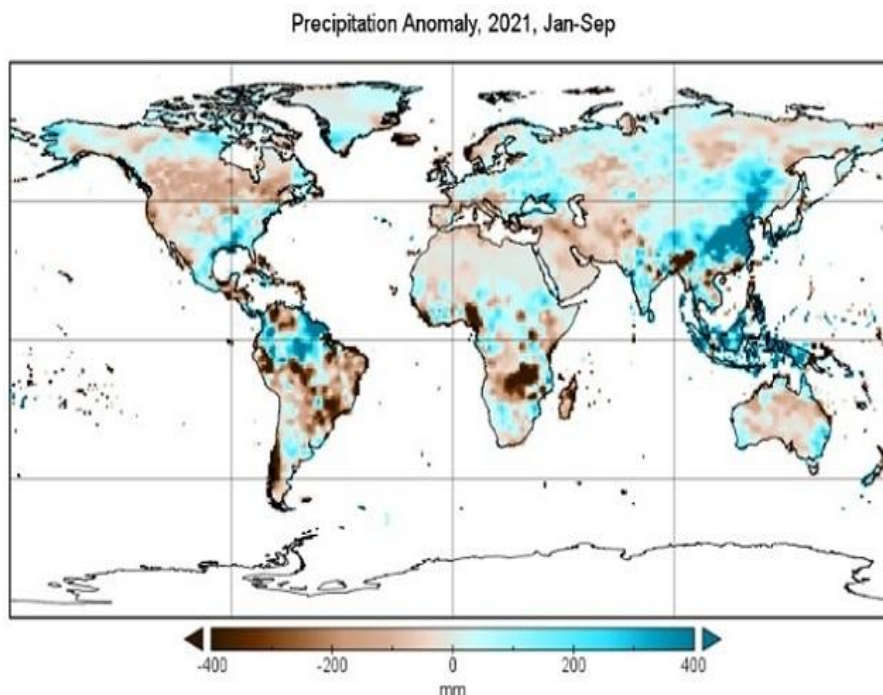


Рис. 3.13. Аномалия общего количества осадков с января по сентябрь 2021 года относительно базового периода 1951 – 2000 г.г.

Таблица 3.9

Месячные суммы осадков в Симферополе (в мм) в 1981-2010 гг.

Месяц	Норма	Месячный минимум	Месячный максимум	Суточный максимум
январь	39	0.0 (1904)	121 (1953)	29 (1953)
февраль	36	2 (1906)	95 (1908)	32 (1908)
март	38	0.0 (1921)	88 (1973)	30 (1973)
апрель	34	0.0 (1903)	101 (1888)	43 (1938)
май	35	0.0 (1907)	136 (1973)	96 (2015)
июнь	58	0.0 (1927)	220 (1912)	101 (1940)
июль	45	0.0 (1895)	183 (1906)	119 (1906)
август	52	0.0 (1893)	290 (2004)	119 (2004)
сентябрь	42	0.0 (1892)	155 (1996)	44 (1985)
октябрь	42	0.1 (1893)	126 (1997)	42 (1934)
ноябрь	49	0.7 (1894)	136 (1909)	59 (1910)
декабрь	45	4 (1972)	159 (1923)	43 (1925)
год	514	221 (1930)	831 (1997)	119 (1906)

3.4. Радиационный баланс и испаряемость

На большей части территории Крыма выпадающих осадков недостаточно для нормального развития растительности с учетом величины испаряемости. Для условий Крыма, как показывает опыт, необходимы осадки в количестве не менее 500 мм в год, чтобы обеспечивать транспирацию растений. Более точную оценку испаряемости можно получить исходя из радиационного баланса поверхности.

Годовой приход суммарной солнечной радиации в Крыму составляет 4500 МДж/м². Однако при расчете теплового баланса с учетом отражения части приходящей радиации и ее переизлучения в ИК-диапазоне правильнее использовать значения радиационного баланса В. Для Крыма он составляет около 2000 МДж/м². Удельная теплота испарения воды при температуре 20°C составляет L = 2,45 МДж/кг (табл. 3.10). Разделив суммарную радиацию на эту величину, получим, что приходящей на 1 кв. м поверхности солнечной радиации достаточно для испарения 1,84 т воды, то есть слоя воды толщиной 1,84 м. Это соответствует максимально возможной испаряемости при полном поглощении падающей радиации.

С учетом же испарения только за счет радиационного баланса получим для испаряемости:

$$E = B/L.$$

Подставив сюда B = 2000 МДж/м² и L = 2,45 МДж/кг, получим 816 кг. Этому значению соответствует испарению слоя воды толщиной 816 мм. С учетом значения В тогда получается, что каждые 100 МДж/м² солнечной энергии способны испарить слой воды толщиной примерно 40 мм. Таким образом, радиационный баланс в среднем по Крыму обеспечивает за год испарение слоя воды толщиной около 80 см. А это превышает среднюю годовую сумму осадков в Крыму в 2,2 раза.

Таблица 3.10

Зависимость удельной теплоты испарения воды от температуры

Температура, градусы Цельсия	Удельная теплота испарения, МДж/кг,
0	2,50
10	2,48
20	2,45
50	2,38
80	2,30

На самом деле при расчете испарения необходимо использовать не среднегодовые, а хотя бы среднемесячные значения температуры, радиационного баланса и осадков. Даже просто радиационные балансы летом и

зимой отличаются на порядок. А ведь летом может быть засуха, урожай погибнет, зато зимой потом может выпасть необходимая сумма осадков. Кроме того, разные регионы Крыма сильно отличаются по годовой и месячным суммам осадков. Для анализа засух нередко используют даже среднесуточные значения метеорологических параметров.

Например, при среднемесечном летнем радиационном балансе 350 МДж/м²·месяц за сутки на испарение может расходоваться до 12 МДж/м². Соответственно, с поверхности влажной почвы тогда за сутки испарится количество воды, соответствующее слою толщиной:

$$d = (12 \text{ МДж/м}^2 / 100 \text{ МДж/м}^2) \cdot 40 \text{ мм} = 4,8 \text{ мм}.$$

В результате запаса почвенной влаги в 15 см хватит на $150/4,8 = 31$ день, то есть на один месяц.

В табл. 3.11 приведены данные измерений месячных радиационного баланса на Карадагской научно-исследовательской геофизической обсерватории (юго-восток Крыма). Изменчивость В связана как с разной высотой солнца над горизонтом, так и с разной продолжительностью солнечного сияния из-за облачности. Большое значение имеет, также, продолжительность светового дня, которая сильно отличается в разные месяцы. Межгодовая изменчивость продолжительности солнечного сияния хорошо видна из таблицы продолжительности солнечного сияния в разные месяцы и разные годы для Севастополя [5], составленной по данным наблюдений с помощью гелиографа на гидрометеорологической станции «Херсонесский маяк» в Севастополе (табл. 3.12). В процентах она особенно велика в период с ноября по март.

В то же время в разных населенных пунктах Крыма продолжительность солнечного сияния в один и тот же месяц сравнительно слабо отличаются (табл. 3.13). Это позволяет использовать данные о среднемесечных значениях радиационного баланса, полученные в Карадаге, использовать в расчетах водного баланса всего Крыма. А они, как видно из табл. 3.11, в разные месяцы отличаются в десятки раз. Это означает, что и расходы влаги на испарение в разные месяцы могут отличаться на порядок.

Таблица 3.11

Значения радиационного баланса в разные месяцы в Карадаге (МДж/м²)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Макс.	29	67	176	310	402	406	427	331	255	121	50	17
Мин.	13	42	134	188	297	339	331	146	163	63	13	8

Таблица 3.12

Продолжительность солнечного сияния в Севастополе (в часах за месяц)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2013	63	88	79	168	300	330	351	311	308	225	85	89
2014	55	48	164	159	232	221	313	338	190	181	98	63
2015	58	79	190	252	332	347	375	379	260	162	112	67
2016	25	101	125	198	261	274	365	289	281	175	73	60
2017	69	111	139	238	264	319	387	355	244	154	54	44
2018	100	117	171	232	268	314	387	334	251	189	84	81
2019	83	108	210	221	309	310	397	370	237	194	140	83
2020	62	75	145	202	267	316	356	326	254	177	98	64

Таблица 3.13

Продолжительность сияния в городах Крыма (в часах за месяц) в 2020 году

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Севастополь	68	82	145	200	263	323	357	327	264	193	97	60
Симферополь	86	98	156	210	274	315	344	314	261	205	110	71
Евпатория	80	92	152	201	271	316	344	318	263	197	96	61
Керчь	70	85	140	189	266	305	337	306	247	180	83	54
Почтовое	76	98	159	200	251	268	333	309	234	190	97	67
Ялта	70	79	134	178	236	285	317	287	234	164	95	65
Феодосия	62	70	127	181	244	282	312	285	240	162	80	48

Прояснить роль облачности в уменьшении прямой солнечной радиации радиационного баланса позволяет отношение наблюдаемой продолжительности солнечного сияния к максимально возможной (табл. 3.14).

Таблица 3.14

Отношение наблюдавшейся продолжительности сияния к возможной (в %)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Севастополь	25	30	44	56	63	74	82	81	75	57	39	27
Евпатория	28	29	41	56	64	72	82	82	76	61	37	26
Ялта	31	33	43	53	60	71	79	80	72	59	41	31
Феодосия	23	28	40	52	64	70	78	79	72	56	35	22

Из табл. 3.14 видно, что в период с ноября по март это отношение не превышает 50 %. Наибольших значений (свыше 80 %) оно достигает в связи с отсутствием облачности в июле и в августе, наименьших (менее 30 %) – в январе и в декабре.

Реальное испарение с поверхности суши меняется от 100 до 1000 мм в год, тогда как испаряемость в пустынях, например, превышает 3000 мм/год. Но

испарение с влажной почвы, покрытой растительностью, все-таки иногда может превышать испаряемость из-за вклада транспирации. И наоборот, если фактическое испарение близко к нулю, это не означает, что засухи нет. В пустынях как раз такая ситуация, так что надо рассматривать соотношение испарения и испаряемости.

По той же причине с испаряемостью надо сравнивать и количество осадков. Хорошо известно, что при той же годовой сумме осадков в одних регионах болота, а в других – полупустыни. Именно отношение суммы осадков за определенный промежуток времени к испаряемости характеризует водный баланс в данном регионе. Хотя, конечно, это упрощенный подход, вообще говоря надо еще учитывать поверхностный сток и просачивание воды вглубь почвы.

В разных странах аналогичный подход применяется при количественном описании степени увлажнения почвы или засушливости климата с помощью различных индексов и коэффициентов. В России наибольшее распространение получили коэффициент увлажнения, коэффициент сухости Будыко, гидротермический коэффициент ГТК Селянинова, индекс Педя. В США и Великобритании чаще используются комбинированные индексы засухи типа индексы тяжести засухи Пальмера (Palmer drought index) [7].

Коэффициент увлажнения обычно определяется для отдельных месяцев как отношение месячной суммы осадков $\sum R_i$ к испаряемости E за тот же период, выраженное в процентах:

$$k = (\sum R_i)/E .$$

Так, при выпадении в летний месяц 40 мм осадков при радиационном балансе 300 МДж/м², получим, что испаряемость составляла 120 мм. Тогда коэффициент увлажнения $k = 33 \%$. По существу, такой подход аналогичен определению индекса сухости М.И. Будыко:

$$ИС = B/(LR) ,$$

где B – радиационный баланс за год, R – годовая сумма осадков и L – скрытая теплота испарения воды. Здесь знаменатель представляет собой энергию, которую необходимо затратить на испарение выпавших осадков. То есть ИС обратно пропорционален k . Более того, если при вычислении k не умножать $(\sum R_i)/E$ на 100 %, то часто можно считать, что $ИС = 1/k$.

3.5. Модели испарения

Вода может либо непосредственно испаряться с влажной поверхности почвы, либо – испаряться растениями, произрастающими на этой почве. В первом случае это физическое испарение, во втором – транспирация. При транспирации испаряется вода, поступающая из корневой зоны почвы, а не только с поверхности почвы или капли на листьях растений. На состояние почвы оказывает влияние суммарное испарение, то есть сумма физического

испарения и транспирации. В обоих случаях испарение прекращается, когда воздух уже насыщен водяным паром.

Испарение воды с поверхности почвы E_p зависит от ее влажности. Влажность почвы θ определяется как содержание почвенной воды (в м^3) в одном м^3 почвы. Таким образом, эта величина измеряется в $\text{м}^3/\text{м}^3$, то есть по сути является безразмерной. Максимальное количество воды θ_f , которое может удержать почва, соответствует состоянию ее насыщения. По существу, это просто пористость почвы, то есть объем почвенного воздуха. При этом θ для конкретного типа почвы может равняться, например, $0,472 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Рассматривают также полевую емкость почвы θ_d – это максимальное количество воды, которое почва может удержать с учетом действия силы тяжести. Для рассмотренного примера типа почвы она равна $0,323 \text{ м}^3/\text{м}^3$. При большем количестве влаги «лишняя» вода просачивается в нижележащие слои. Обычно отношение θ_d/θ_f равно $0,5 - 0,8$ в зависимости от типа почвы, в нашем примере это $0,68$.

При описании почвенной засухи важным является также критическое содержание влаги θ_w , ниже которого растения уже не смогут брать влагу из почвы. Для данного примера это $0,171 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Таким образом, доступная для растений влажность почвы $\theta_{\text{дост}} = \theta_d - \theta_w$, то есть при толщине корнеобитаемого слоя d запас доступной растениям влаги в расчете на 1 м^2 равен $\theta_{\text{дост}} \cdot d$.

В ряде работ увлажненность почвы выражают через толщину эквивалентного слоя воды, как это принято для атмосферных осадков в метеорологии. Так, если рассматривается слой почвы толщиной 1 м , то при влажности почвы $0,17 \text{ м}^3/\text{м}^3$ содержание в ней воды соответствует слою 17 см . Это удобнее для практических расчетов, обычно содержание воды в корнеобитаемом слое $15 - 20 \text{ см}$, что примерно соответствует толщине слоя воды в небольшом ведре.

Существуют разные схемы параметризации зависимости реального испарения от влажности почвы, то есть функции $E_p(\theta)$. Одной из них как раз и является модель ведра (bucket model). В этой модели вводится коэффициент β , зависящий от типа почвы, ее влажности, ее температуры, находящейся на ней растительности. Зависимость испарения E_p от испаряемости E с помощью данного коэффициента описывается при этом линейной зависимостью:

$$E_p = \beta \cdot E,$$

М.И. Будыко предложил при проведении расчетов определять значение параметра β в зависимости от влажности почвы θ следующим образом: при влажности почвы меньше критической $\theta_{\text{кр}}$ считать $\beta = \theta/\theta_{\text{кр}}$. Если же $\theta > \theta_{\text{кр}}$, то испарение берется равным испаряемости, что соответствует $\beta=1$. При этом ситуация сильно упрощается. В рамках данной модели специфика испарения в каждом конкретном случае описывается влажностью почвы, значением испаряемости и всего одним свободным параметром $\theta_{\text{кр}}$.

На самом деле понятно, что на суммарное испарение влияет, например, еще и наличие растительности. Поэтому коэффициент β обычно называют еще

фактором поверхностной влажности. Если почва не покрыта растительностью (bare soil), то испаряется влага, содержащаяся только в самом верхнем слое, толщина которого всего 1 – 2 см. В этом случае модель учитывает лишь гидрологически активный слой почвы, который обладает весьма ограниченной емкостью для накопления влаги. При выпадении осадков только эта емкость используется для аккумуляции осадков, все что больше емкости этого «ведра» - уходит с поверхностным стоком. Эмпирической основой модели являются среднесуточные данные о влажности почвы и интенсивности испарения.

Если же говорить про вклад транспирации, то это фактически испарение влаги с гораздо большей глубины, из корнеобитаемого слоя толщиной в несколько метров, как правило 1 – 5 м. При этом вода переносится, например, от корней к листьям деревьев за счет разницы в осмотическом давлении в их тканях. Кроме того, обычно верхние несколько метров почвы не насыщены водой, так что в общем случае надо учитывать изменение с глубиной влажности почвы и ее температуры на несколько метров вглубь.

На практике основной интерес представляет скорость испарения V , под которой понимают толщину слоя воды, которая испаряется с поверхности почвы за единицу времени. Обычно ее выражают в миллиметрах за сутки, месяц или год. Она пропорциональна разности между содержанием в воздухе насыщенных паров воды q_s и их фактическим содержанием q . Еще скорость испарения зависит от скорости ветра U (именно поэтому в определенных условиях сильные ветра называют суховеями). Зависимость V от ветра вообще говоря, нелинейная, ее описывают заданием переменного коэффициента $K(U)$. Таким образом:

$$V = K(U) \cdot (q_s - q).$$

При этом содержание насыщенных паров q_s сильно зависит от температуры воздуха. Зависимость близка к экспоненциальной, так при повышении температуры воздуха от 0 до 30 °C значение q_s удваивается через каждые 10 градусов.

Отсюда следует, что скорость испарения может быть большой по трем причинам:

- 1) увеличение коэффициента K при сильном ветре;
- 2) большое значение разности $q_s - q$ из-за больших значений величин q_s и q при высокой температуре воздуха;
- 3) близость к нулю абсолютной влажности воздуха q .

Естественно, испарение с поверхности почвы может происходить только в том случае, если эта поверхность влажная. В этом смысле последнее выражение описывает не испарение, а испаряемость. Ведь под испаряемостью понимают максимально возможное испарение, которое на самом деле соответствует испарению с поверхности воды, а не почвы.

Для расчета испаряемости используются также полуэмпирические формулы. Так, на морских гидрометеорологических станциях среднемесячные значения испарения с поверхности Черного моря рассчитываются по формуле:

$$E(\text{мм}) = 3,5 \cdot U(\text{м/с}) \cdot (e_0 - e),$$

где U – скорость ветра, e – парциальное давление водяного пара на определенной высоте над поверхностью воды в гПа и e_0 – парциальное давление водяного пара у поверхности воды, то есть давление насыщенного пара при температуре воды. Входящая сюда разность $(e - e_0)$ называется дефицитом насыщения, она выражается через относительную влажность воздуха f :

$$e_0 - e = (1 - f/100) \cdot e_0 .$$

Такого рода зависимости широко используются и для описания газообмена водоема с атмосферой, например, обмена кислородом через свободную поверхность воды. В этом случае величину V называют скоростью газообмена, а q – концентрацией растворенного в воде газа [3, 8].

Глава 4

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАНСГРАНИЧНОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОСТОЧНОМ СРЕДИЗЕМНОМОРЬЕ

4.1. Ограничение стока реки Евфрат

Перекрытие Северо-Крымского канала Украиной в апреле 2014 г. и его открытие в результате военной операции в марте 2022 г. вовсе не являются беспрецедентными событиями, даже если ограничиться ближайшим к Крыму регионом Восточного Средиземноморья. По мере усиления засушливости климата и увеличения численности населения конфликты на трансграничных реках происходят все чаще.

Наиболее напряженная ситуация с дефицитом воды складывается в таком регионе мира, как Ближний Восток. Все страны региона расположены в наиболее засушливых климатических условиях, где запасы водных ресурсов резко ограничены. Пустыни покрывают почти 60 % территории Израиля, 70 % Сирии, 85 %) Иордании и 90 % территории Египта. При этом районы с высоким уровнем водозабора и высокой плотностью населения располагаются вдоль речных систем.

Особенно показателен в этом плане пример Евфрата, верхнее течение которого находится в Турции, а потом он протекает по территории Сирии и Ирака. На Сирию приходится 20 % его водосборного бассейна, однако сам Евфрат и его левые притоки составляют 80 % всех водных ресурсов Сирии. На территории Сирии при содействии СССР в 1960-х и 1970-х годах на реке Евфрат вблизи границы с Турцией было построено большое водохранилище емкостью 12 км³, получившее название Аль-Ассад в честь тогдашнего президента Сирии Хафеза Ассада. Для его создания реку перекрыли земляной плотиной высотой 40 м. Только заполнение водохранилища водой продолжалось четыре года, с 1973 по 1976 г.

Вода из нового водохранилища стала использоваться для орошения, несмотря на засушливый континентальный климат стали получать два урожая зерновых за год, расширили плантации хлопка. Само водохранилище стало основным местом для зимовки мигрирующих птиц в Западной Азии. Рядом с плотиной построили мощную ГЭС Табка, которая вырабатывала тогда больше половины электроэнергии Сирии. Разрабатывались и дальнейшие планы строительства каскада плотин, водохранилищ и ГЭС в Сирии. Однако уже тогда, в 1970-х годах строительство столь мощного гидроузла уже приводило к серьезным международным проблемам, связанным с трансграничным водопользованием.

При заполнении водохранилища Аль-Ассад в 1975 г., Ирак пригрозил разбомбить плотину, потому что из-за заполнения водохранилища уровень воды в реке Евфрат на территории Ирака упал до критического. Хотя Саддам Хуссейн тогда еще не был президентом Ирака, Сирии был объявлен ультиматум –

немедленно открыть водосброс на плотине, в противном случае она будет уничтожена авиацией Ирака. До войны тогда дело не дошло, с помощью посредников в лице СССР и Саудовской Аравии конфликт удалось уладить. Стороны договорились, что Сирия будет компенсировать Ираку уменьшение стока Евфрата поставками электроэнергии с ГЭС «Табка».

Тем не менее, проблемы с ограничением стока Евфрата на этом не кончились. В начале 1980-х годов Турция начала строить на Евфрате свой каскад водохранилищ и ГЭС. Достаточно сказать, что по этому плану, который называется Юго-Восточный Анатолийский проект (GAP), до 2040 г. планировалось построить 22 плотины и 19 ГЭС, причем их суммарная мощность будет на порядок больше, чем у ГЭС «Табка». И уже в 1980-х годах на Евфрате была построена крупнейшая в Турции плотина Кемаля Ататюрка, опять же названная в честь президента. При этом в 1990-х годах при заполнении соответствующего водохранилища сток Евфрата полностью перекрывался на месяц уже для самой Сирии.

Уже после постройки плотины Турция продолжала регулировать водосброс через нее. Когда ограничение стока накладывалось на засушливый год, последствия для сельского хозяйства Сирии были катастрофическими. Дело в том, что в маловодный год сток Евфрата даже по естественным причинам уменьшается в три раза. Из-за этого по состоянию на 2011 г. уже миллионы сирийцев мигрировали с севера Сирии, бросив свои дома и земельные участки. А в Турции к 2001 г. было построено 19 плотин, к 2000 г. она стала получать за счет новых ГЭС большое количество дешевой электроэнергии. Хорошо известно, что уже сейчас Турция перекрывает 30 % воды Сирии и 50 % - Ираку, а по завершению проекта сток Евфрата в Сирии уменьшится в среднем на 40 %, а Тигра и Евфрата в Ираке – на 80 %. При этом Турция увеличила производство сельскохозяйственной продукции в 2,5 раза за счет привлечения новых орошаемых земель. Это как раз ситуация, которую Генеральный Секретарь ООН в 2011 г. Пан Ге Мун имел в виду, когда говорил, что мир находится на пороге «водных войн».

Теперь уже Сирия попыталась урегулировать «водные отношения» с Турцией и в 1987 г. было заключено временное соглашение, по которому Турция обязалась пропускать в Сирию не менее 500 м³/с воды. Позднее оно было зарегистрировано в 1994 г. в ООН. Однако на самом деле Турция пропускает только 200 м³/с, а иногда и совсем перекрывает Евфрат на 1-2 месяца. Так было в мае того же 2014 г., тогда уровень воды в водохранилище Аль-Ассад упал на 7 м, ушла вода из колодцев. Не далее, как в январе 2021 г. Турция уменьшала расход поступающей в Сирию воды Евфрата на 60 %, что привело к сужению русла на 300 м.

В 1992 г. ООН приняла Конвенцию по трансграничным водным ресурсам, в 1997 г. – Конвенцию об использовании международных водных путей. Но Турция не подписала ее. На основании внутренних документов Турция в вопросах трансграничного водопользования придерживается принципа «больше урожая на единицу воды» на бассейновом уровне для рек Тигр и Евфрат [10].

Кроме того, при распределении воды этих рек учитывается естественная межгодовая изменчивость стока. Так, в самые засушливые периоды (1988-1989 г.г., 2007–2008 г.г.) расход Евфрата падал до $50 \text{ м}^3/\text{с}$ [10]. Естественно, в такие годы Турция при всем желании не сможет обеспечивать транзитный сток величиной $500 \text{ м}^3/\text{с}$.

4.2. Теоретико-игровые модели взаимодействия двух сторон при строительстве дамб

Обычно при описании конфликтов применяют специфический математический аппарат – теория игр. В этом случае каждой реальной ситуации ставится в соответствии система матриц выигрышей, анализ которых позволяет выбрать оптимальные стратегии игроков. Рассмотрим применение теории игр для описания близкого к проблеме трансграничного взаимодействия двух сторон («игроков»), территории которых расположены рядом на берегу реки. Это могут быть как отдельные страны, так и просто разные хозяйствующие субъекты. Характер их взаимодействия при трансграничном водопользовании поясняет описанная в литературе игра «защита от наводнения». Ее анализ позволяет понять суть конфликтов, связанных с так называемыми играми с ненулевой суммой. Хотя при этом проблема связана с борьбой с паводками, а не с дефицитом воды.

Допустим, стороны решают (каждый отдельно) вопрос о строительстве со стороны реки дамбы с целью защиты своей территории от наводнения во время паводка. Опишем эту задачу в виде парной симметричной игры вида 2×2 с ненулевой суммой. При этом у каждого из игроков всего по две стратегии: первая – не строить дамбу, вторая – строить дамбу.

Традиционно наводнение рассматривается как стихийное бедствие и многие страны строят дамбы, чтобы защитить свои земли от наводнения. При этом строительство дамбы в одном месте на самом деле увеличивает угрозу наводнения в других местах, так как уровень воды вблизи дамбы поднимется. И тогда другим игрокам, земли которых расположены на другом берегу реки или выше и ниже по течению, тем более придется потом строить дамбы. Однако строительство связано с затратой значительных средств, и в принципе эти затраты на сооружение дамбы могут даже превысить выгоду, которую они дают, защищая земли от наводнения. Для количественного анализа последствий строительства дамб рассмотрим парную игру, в которой «выигрышами» игроков являются соответствующие суммы затрат на строительство и нанесенный наводнением ущерб.

Допустим, что в отсутствие дамб наводнение наносит каждому игроку ущерб в 4 млрд рублей, а строительство дамб обойдется в 2 млрд руб. для каждого из них. Оценим выигрыши игроков для каждой возможной пары стратегий. Будем считать, что строительство дамбы полностью защищает данного игрока от наводнения. Однако его выигрыш при этом равен затратам на

строительство, то есть минус 2 млрд руб. Ему это выгодно, ведь ущерб от наводнения в противном случае был бы 4 млрд руб.

Поскольку рассматривается парная игра с ненулевой суммой, то для каждой из четырех пар стратегий (1 и 1, 1 и 2, 2 и 1, 1 и 2) нужно задать отдельно выигрыши каждого из двух игроков. Таким образом, для каждой пары стратегий указывается два выигрыша, в результате чего и формируется биматричная игра вида 2×2 .

Если оба игрока не строят дамб, то все просто – выигрыши обоих игроков отрицательные (то есть это по сути проигрыши) и они равны ущербу от наводнения, то есть по -4 млрд руб. Само строительство дамбы обходится каждому в 2 млрд руб., поэтому если один строит, а другой нет, то у первого нет потерь от наводнения, но за счет расходов на строительство выигрыш будет – 2 млрд руб. У второго при этом из-за большего подъема воды выигрыш пусть будет уже не -4, а -10 млрд руб.

Будем считать, что если оба игрока построят по дамбе, то ущерб от наводнения для каждого из них снизится с 4 до 3 млрд руб. Тогда с учетом их затрат на строительство дамб результирующие выигрыши обоих игроков составят по -5 млрд руб. Матрица такой игры с учетом оцененных выигрышей имеет вид табл. 4.1.

Таблица 4.1

Матрица игры «Защита от наводнения». Выигрыши в млрд руб.
2-й игрок

		Не строить	Строить
1-й игрок	Не строить	(-4,-4)	(-10,-2)
	Строить	(-2, -10)	(-5,-5)

Ее анализ показывает, что в случае, когда оба игрока строят дамбы, их расходы на строительство вдвое превышают эффект от ее действия (они затратили по 2 млрд руб., а вред от наводнения уменьшился для каждого на 1 млрд руб.). То есть это невыгодный для обоих вариант, лучше тогда не строить никому дамб и получить выигрыш по -4 млрд руб.

И это, по сути, игра типа известной дилеммы заключенного. И там, и там у каждого игрока доминантная стратегия – строить дамбу (как сознаться в «дилемме»). Этой паре стратегий соответствует равновесие по Нэшу в данном случае. Хотя если обоим игрокам договориться, то лучше обоим не строить дамбы вообще. Но это уже кооперативное поведение, выходящее за рамки классической теории некооперативных игр.

В случае защиты от наводнения должно быть такое законодательство, которое поощряет строительство именно такой системы дамб, которая минимизирует ущерб для всей группы землепользователей по обе стороны реки. То есть надо исходить в первую очередь из интересов общества («общее

благо)), а не отдельных сторон. Формально этому соответствует минимизация суммарного проигрыша. Иначе не удастся учесть нередко взаимоисключающие или в значительной мере противоречащие друг другу интересы сторон, соответствующие играм с нулевой суммой.

4.3. Игра «Перекрытие стока»

Очевидно, аналогичная игра, описывающая перераспределение речного стока между двумя странами, также должна исходить из принципа максимизации суммарного выигрыша обеих сторон. При этом ущерб, наносимый действием одной из сторон, возмещается в виде обязательного компенсационного платежа, в качестве которого может выступать, например, та же электроэнергия, вырабатываемая за счет увеличения напора ГЭС. Или продукты земледелия, выращенные на орошаемых землях.

В отличие от рассмотренной в п. 4.2 типовой игры, здесь игра не может быть симметричной. У игроков теперь разные стратегии – первый может строить или не строить плотину, а второй – разрушать или не разрушать ее. Пусть строительство плотины обходится первому игроку в 2 млрд. руб. и при этом за счет новых возможностей он получает потом выгоду 4 млрд. рублей. При этом его чистый выигрыш составит $-2 + 4 = 2$ млрд руб. В свою очередь, за счет уменьшения стока второму игроку (стране ниже по течению) это строительство наносит ущерб 1 млрд. руб. Поэтому он принимает решение – разрушать плотину или нет.

Если не разрушает – его выигрыш равен -1. Если же он затратит 0,5 млрд руб. и разрушит плотину, то его чистый выигрыш совпадет с этими затратами и составит минус 0,5 млрд руб. В результате получим матрицу игры, представленную в табл. 4.2. В ней нет равновесной по Нэшу точки, если плотина будет построена, то вторая сторона ее разрушит.

Таблица 4.2

Матрица игры «Перекрытие стока». Выигрыши в млрд руб.

2-й игрок

		Не разрушать	Разрушать
1-й игрок	Не строить	(0, 0)	
	Строить	(2, -1)	(-2, -0,5)

Поэтому надо подправить матрицу компенсационной добавкой. На самом деле выход состоит в том, что первый игрок должен поделиться частью своего выигрыша. Это достигается компенсационным платежом размером не менее 0,5 млрд руб. со стороны первого игрока. При таком платеже величиной 1 млрд руб. чистые выигрыши игроков для пары стратегий «Строить – не разрушать»

составят (1, 0). Как видно из табл. 4.3, теперь уже эта пара стратегий является равновесной по Нэшу. Более того, вторая сторона тогда вообще ничего не теряет от перекрытия реки. А общее благо (сумма выигрышей сторон) как и прежде увеличивается по сравнению с «нулевым» вариантом на 1 млрд. руб.

Таблица 4.3

Матрица игры «Перекрытие стока» с компенсацией. Выигрыши в млрд руб.

2-й игрок

		Не разрушать	Разрушать
1-й игрок	Не строить	(0, 0)	
	Строить	(1, 0)	(-2, -0,5)

В данном варианте игры политические факторы не рассматривались. На самом деле они тоже имеют место, например, при перекрытии Северо-Крымского канала в 2014 г. именно политический фактор был определяющим. Да и Турция до сих пор нередко использует частичное перекрытие Евфрата, чтобы помешать курдам закрепиться на севере Сирии. Известно, что еще на этапе строительства основной плотины в Турции в зону затопления попало несколько курдских городов и деревень на территории самой Турции, что привело к отселению 78 тысяч человек. Другим примером политического решения является перекрытие Евфрата 23 февраля 2017 г. сразу после освобождения Алеппо от ИГИЛ. В результате город остался без водоснабжения и электроснабжения (была остановлена ГЭС).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перекрытие Северо-Крымского канала показало на примере Крыма, к каким последствиям в водном хозяйстве приведет усиление засушливости климата на юге Европы в ближайшие годы. При этом само изменение климата в сторону потепления уже давно стало реальностью, а не гипотезой [2, 4]. Так, с марта 2022 г. в России вводятся новые климатические нормы, по которым, например, среднемесячная температура января в Москве повышается сразу на 3 °С.

После перекрытия Северо-Крымского канала в апреле 2014 г. особенно сильно проявилось влияние изменения климата именно на водный баланс Крыма. Анализ изменения среднемесячных температур и осадков, продолжительности солнечного сияния, а также имеющихся данных по изменению уровней воды в водохранилищах в разных районах Крыма за последние годы позволили выявить ряд существенных закономерностей.

На полуострове усилились засушливые явления, связанные с глобальным потеплением климата [1]. Повышение среднегодовой температуры на 2 °С, уменьшение количества осадков и увеличение средней скорости ветра привели к усилению испарения с водного зеркала водохранилищ, что отрицательно сказывается на заполняемости водохранилищ. Кроме того, последние исследования показывают, что из-за большой испаряемости в Крыму сток местных рек аномально связан с площадью их водосборного бассейна – он уменьшается с увеличением площади бассейна [6].

Вследствие глобального потепления происходит уменьшение накопления запасов снега в горах Крыма, в связи с чем интенсивность паводков на реках Крыма в марте и апреле уменьшается. Кроме того, по данным измерений сумм осадков в горах Южного берега Крыма за последние десять лет количество осадков в период с марта по май уменьшалось в среднем на 10 миллиметров в год. Распределение сумм осадков по сезонам и по интенсивности ливней также имеет большое значение для заполняемости водохранилищ.

По причине сейсмических и карстовых явлений в предгорье и горных районах Крыма, эксплуатация действующих водохранилищ и строительство новых осложнено. В то же время основные реки Крыма берут начало в горном Крыму, их питание связано с большим количеством выпадающих здесь осадков и таянием накопленного за зиму снега.

Большое значение имеет также анализ потерь воды из водохранилищ на испарение и фильтрацию, которые по некоторым оценкам вполне сравнимы с расходами воды на водоснабжение. В последние годы для режима наполнения водохранилищ Крыма характерны сильные межгодовые отличия наполняемости в период с декабря по май. В отдельные годы, например, в 2020 году, даже в конце зимнего периода наполняемость ряда водохранилищ Крыма соответствовало мертвому объему. В период расходования воды из

водохранилища с июня по ноябрь графики наполненности практически совпадают в разные годы.

Среди практических мер по смягчению последствий нехватки воды в водохранилищах можно отметить следующие:

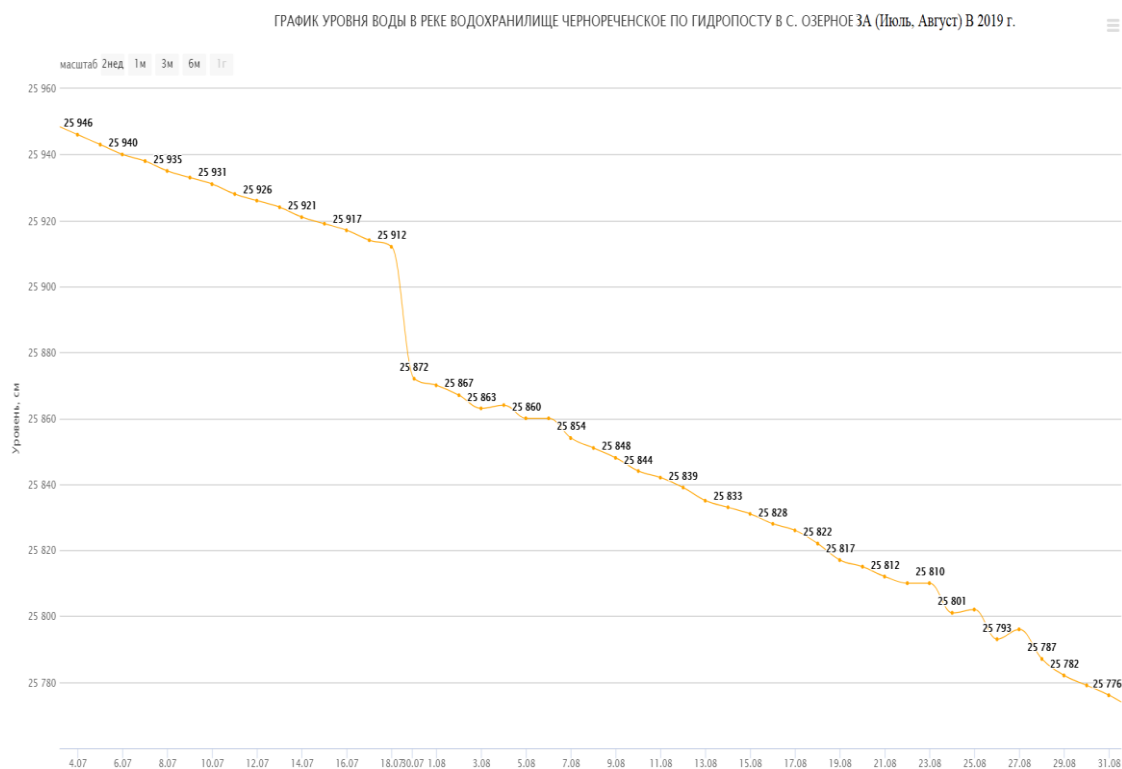
- опреснение морской воды для орошения или потребления в жилищно-коммунальном хозяйстве;
- изменение севооборота в засушливые годы путем повышения доли культур, лучше переносящих дефицит влаги;
- сбор и хранение дождевой воды с крыш и с других водосборов;
- очищение сточных вод для повторного использования в качестве технической воды;
- регулирование водопотребления, то есть введение ограничений и технологий экономного расходования воды (например, переход на капельное орошение).

Помимо усиления дефицита воды для юга Европы и Средиземноморья ближайшими негативными последствиями изменения климата станут волны жары и значительный ущерб сельскому хозяйству, в том числе для виноградарства. Ожидается также проникновение в экосистему Крыма новых видов растений и животных, изменение сроков цветения растений и миграции птиц.

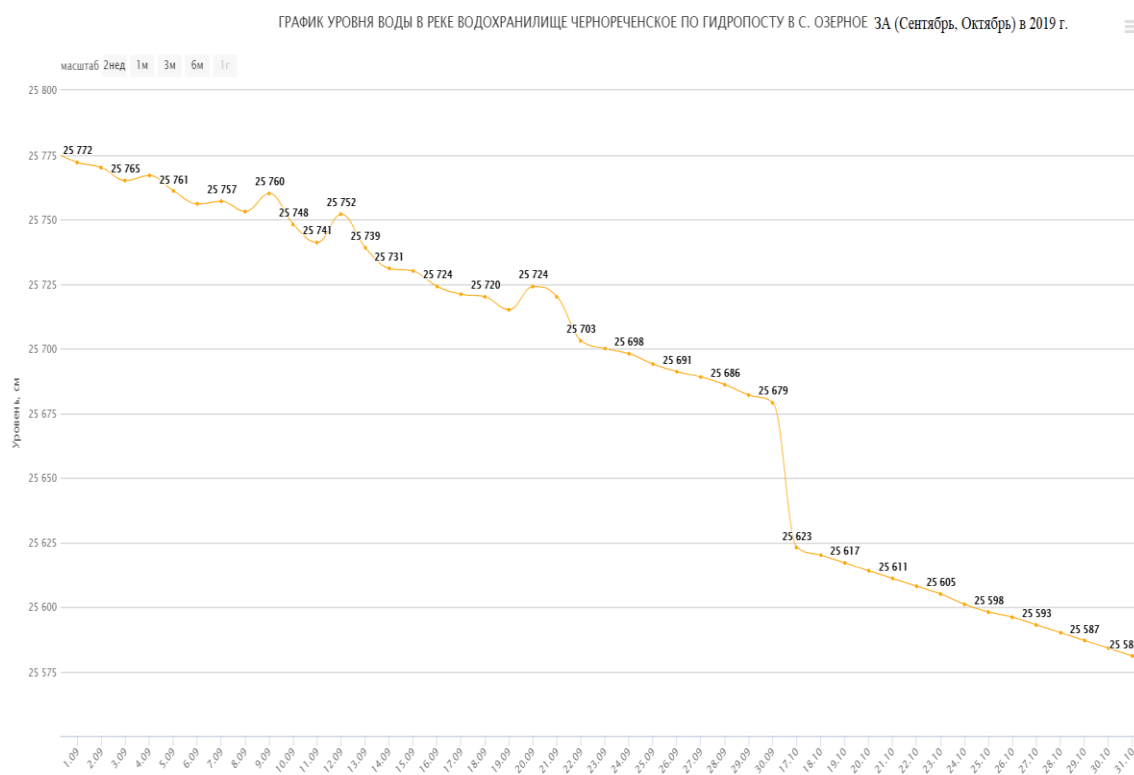
ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтерев А.Х. — Изменение климата Крыма за последние десятилетия / А.Х. Дегтерев // Вопросы безопасности. – 2020. – № 2. – С.1–6.
2. Дегтерев А.Х. Оценка повышения температуры деятельного слоя Черного моря за период 1985-1997 годы / А.Х. Дегтерев // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 6. – С.72–76.
3. Дегтерев А.Х. Траекторный подход в морской геофизике / А.Х. Дегтерев. – Севастополь: СевГУ, 2020. – 123 с. Текст : электронный.
4. Дегтерев А.Х. Экология потепления / А.Х. Дегтерев, Л.В. Еремеева, А.И. Рябинин. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – 80 с.
5. Дегтерев А.Х. Изменение суммарной солнечной радиации в Крыму / А.Х. Дегтерев, В.И. Мордашев // Вестник СевГТУ. Механика, энергетика, экология. – Севастополь, 2003, вып. 48. – С.201–205.
6. Богуцкая Е. М., Средний многолетний сток рек юго-западной части Крымского полуострова / Е.М. Богуцкая, А.Г. Косицкий, Д.Н. Айбулатов, М.Г. Гречушникова // Водное хозяйство России. – 2020. – № 2. – С.37–51.
7. Егоров В.Н. Бассейн Средиземного моря как единая экосистема: проблемы и перспективы международного сотрудничества / В.Н. Егоров, Л.В. Малахова, А.Х. Дегтерев, М.Н. Юрлов // Вестник РУДН. Серия: Международные отношения. – 2021. – Т.21, № 4. – С.625–641.
8. Бютнер Э.К. Планетарный газообмен / Э.К. Бютнер. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 240 с.
9. Кокорин А.О. Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК / А.О. Кокорин. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. – 80 с.
10. Рысбеков Ю.Х., Рысбеков А.Ю. Управление водными ресурсами в Турции / Ю.Х. Рысбеков, А.Ю. Рысбеков. – Ташкент: НИЦ МКВК, 2015. – 52 с.
11. <https://allrivers.info/>.
12. <https://pogoda-service.ru/>.
13. <https://water-rf.ru/>.
14. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

ПРИЛОЖЕНИЕ



а



б

Рис. 1. Посуточное изменение уровня воды в Чернореченском водохранилище (с. Озерное) летом (а) и осенью (б) 2019 г.

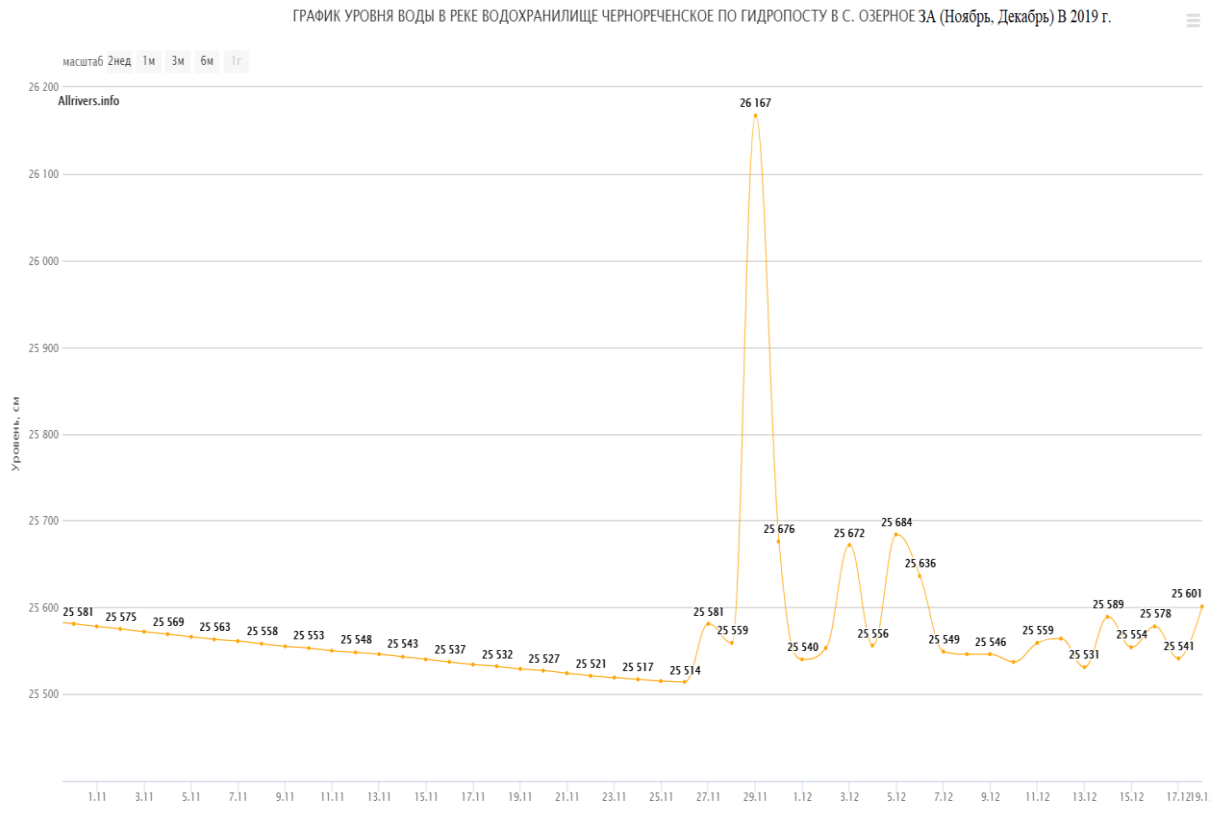


Рис. 2. Стабилизация уровня воды в Чернореченском водохранилище в ноябре-декабре 2019 г.

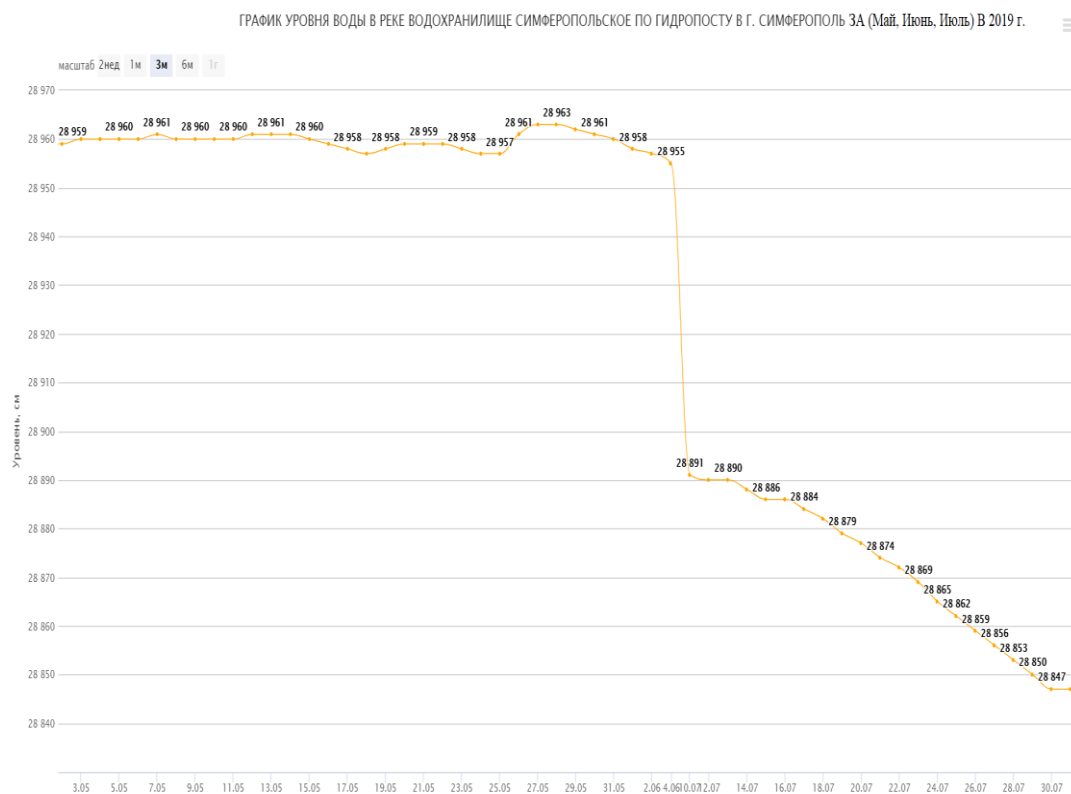


Рис. 3. Изменение уровня воды в Симферопольском водохранилище в мае-июле 2019 г.

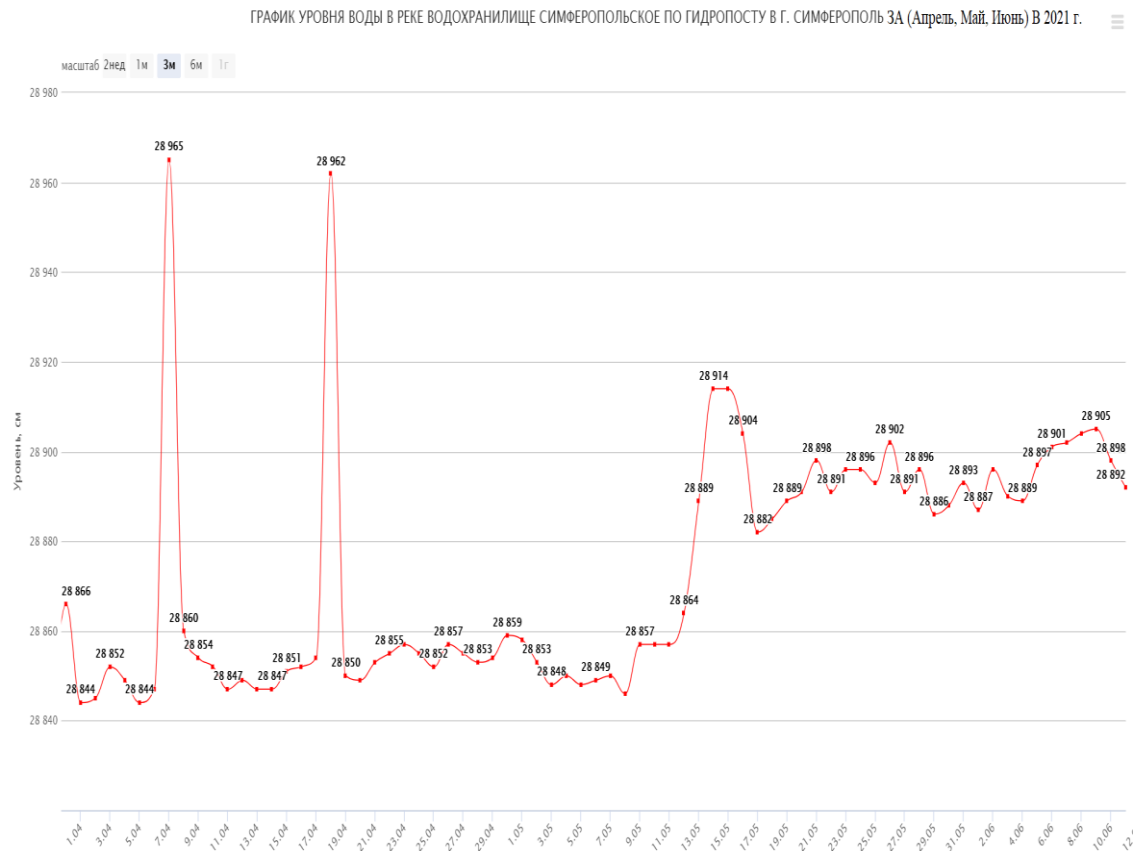


Рис. 4. Изменение уровня воды в Симферопольском водохранилище в апреле-июне 2021 г.

Научное издание

Дегтерев Андрей Харитонович

**ЗАПОЛНЯЕМОСТЬ
ВОДОХРАНИЛИЩ КРЫМА
В ПЕРИОД ПЕРЕКРЫТИЯ
СЕВЕРО-КРЫМСКОГО КАНАЛА**

Монография

В авторской редакции

Изд. № 33/2022. Объем 4,5 п.л. Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 4,41.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»