Динамика площадей водохранилищ полуострова Крым

С. С. Шинкаренко [1, 2], Д. А. Солодовников [3], С. А. Барталев [1], А. А. Васильченко [2], А. А. Выприцкий [2]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: shinkarenkos@yfanc.ru
[2] *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия*
[3] *Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062, Россия*

В 2020 г. на юге европейской части России в результате засухи и маловодья на реках сложилась критическая ситуация с наполнением водохранилищ. Наиболее сложная обстановка наблюдалась на п-ове Крым. После перекрытия подачи днепровской воды по Северо-Крымскому каналу на полуострове возник острый дефицит воды. В то же время в Крыму плохо развита сеть государственного гидрологического мониторинга водохранилищ. Из 34 пунктов гидрологических наблюдений ФГБУ «Крымское УГМС» только один расположен на водохранилище, в Государственном водном реестре отсутствуют характеристики остальных 22 водохранилищ. В работе показаны возможности использования спутниковых изображений Landsat, Sentinel-2 за 1984–2020 гг. для мониторинга площадей водохранилищ полуострова. Проанализирована динамика площадей, установлена связь площадей и годовых сумм осадков. Самым маловодным годом был 1994 г., когда водохранилища естественного стока были наполнены на 20 %, в 1984 и 2020 гг. площадь водохранилищ составляла около 40 % от проектной. Наливные водохранилища стали уменьшаться сразу после прекращения подачи воды из канала в 2014 г. и в настоящее время наполнены на 20 % проектной площади. В результате сопоставления объёмов и соответствующих площадей водохранилищ получены уравнения связи этих величин, на основе которых можно оценить запас воды по результатам спутниковых наблюдений.

Ключевые слова: водохранилище, Крымский полуостров, мониторинг, дистанционное зондирование, Landsat

Одобрена к печати: 29.09.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241

Введение

В 2020 г. на юге европейской части России сложилась критическая ситуация с наполнением многих водохранилищ (Шинкаренко и др., 2021). Например, уровень Краснодарского вдхр. снизился до УМО (уровень мёртвого объёма), а уровень Цимлянского вдхр. был всего на метр выше УМО. Объём Симферопольского вдхр. на осень 2020 г. составлял всего 10–15 % от проектного. Причём критическая ситуация с поверхностными источниками пресных вод в Крыму характерна не только для 2020 г. После прекращения подачи воды на полуостров по Северо-Крымскому каналу (СКК), обеспечивавшему до 85 % потребности в воде, в 2014 г. в Крыму сложился дефицит водных ресурсов, в результате которого в крупных городах периодически вводились ограничения по подаче воды (Василенко, 2016).

На крымских водохранилищах очень слабо развита сеть государственного гидрологического мониторинга. По данным Государственного водного реестра и Схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО), из 34 пунктов гидрологических наблюдений Федерального государственного бюджетного учреждения «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу природной среды» (ФГБУ «Крымское УГМС») только один расположен на водохранилище (с. Счастливое), а из 22 пунктов наблюдений за загрязнением поверхностных вод на водохранилищах расположено 6 створов. Также на полуострове размещены 22 скважины наблюдательной сети мониторинга подземных вод (Схема..., 2017). В соответствии с наличием и доступностью данных проводятся исследования гидрологического режима в Крыму. Так, большая часть современных работ посвящена анализу подземных

вод (Джамалов и др., 2018; Мазина и др., 2009; Dublyansky et al., 2019), естественных гиперсолёных водоёмов (Ануфриева и др., 2020; Руднева, Шайда, 2020), проблеме качества воды (Байков, 2009; Кобечинская и др., 2020; Юровский, Каюкова, 2015), характеристикам стока рек (Богуцкая и др., 2020; Гопченко и др., 2015; Тимченко, 2008, 2009) либо общим вопросам водохозяйственной деятельности (Волкова, Захаров, 2019; Иванкова, 2017; Каюкова и др., 2014, 2016; Соцкова, 2011). Регулярные сообщения Федерального агентства водных ресурсов (Росводресурсы) о водохозяйственной обстановке на территории России (https://voda.gov.ru/) также не содержат сведения о водохранилищах Крымского п-ова. Только некоторые работы затрагивают аспекты отдельных водохранилищ (Иванкова, 2017; Каюкова и др., 2014), при этом не опираясь на какие-либо количественные показатели динамики их состояния: уровни, объёмы, величины забора воды и др. Разделы ретроспективного анализа потребления воды СКИОВО Республики Крым целиком разработаны на основе открытых источников, в ней также отсутствуют сведения о гидрологических постах на водохранилищах (Схема..., 2016). Это вызвано недостаточным охватом и доступностью данных государственной сети мониторинга.

Таблица 1. Водохранилища Крымского п-ова
(Схема..., 2016, 2017; https://meco.rk.gov.ru/ru/structure/60)

Название водохранилища	Источник питания	ВХУ	Назначение	Год наполнения	Объём, млн м^3	
					При НПУ	Полезный
Водохранилища естественного стока						
Альминское	р. Альма	21.01.00.002	О	1934	6,20	6,00
Аянское	р. Аян	21.02.00.002	В	1933	3,90	3,75
Балановское	р. Зуя	21.02.00.002	О, Р	1974	5,00	4,75
Бахчисарайское	р. Кача	21.01.00.002	О	1935	6,90	6,64
Белогорское	р. Биюк-Карасу	21.02.00.002	О	1972	23,30	20,30
Загорское	р. Кача	21.01.00.002	В	1980	27,90	25,65
Изобильненское	р. Улу-Узень	21.01.00.004	В	1979	13,30	11,95
Кутузовское	р. Демерджи	21.01.00.004	В, О	1986	1,10	0,71
Льговское	б. Змеиная	21.02.00.003	О	1977	2,20	1,96
Партизанское	р. Альма	21.01.00.002	В	1966	34,40	32,20
Симферопольское	р. Салгир	21.02.00.002	В, О, ГРЭС	1956	36,00	32,95
Старокрымское	р Чурюк-Су	21.02.00.003	В, О	1957	3,20	2,92
Счастливенское	р. Манаготра	21.01.00.002	В	1964	11,80	11,54
Тайганское	б. Джавайганская	21.02.00.002	О	1938	13,80	13,60
Чернореченское	р. Чёрная	21.01.00.003	В	1956	64,20	–
Наливные водохранилища						
Зеленоярское	СКК	21.02.00.004	В	1975	3,00	2,01
Керченское	СКК	21.02.00.004	В	1975	24,00	–
Межгорное	СКК	21.01.00.001	В	1989	50,00	–
Самарли	СКК	21.02.00.004	В	1978	8,10	–
Сокольское	СКК	21.02.00.004	Р	1972	2,26	–
Феодосийское	СКК	21.01.00.006	В	1971	15,30	11,37
Фронтовое	СКК	21.01.00.003	В	1978	35,00	–
Юзмак	СКК	21.02.00.004	В	1948	7,70	–

Примечание: НПУ — нормальный подпорный уровень; О — орошение, В — водоснабжение, Р — рекреация; прочерк — нет данных.

В настоящее время в открытом доступе размещено множество данных дистанционного зондирования и основанных на них информационных продуктов. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса используются для очень широкого спектра задач, в том числе и для наблюдений за состоянием водных объектов и прибрежных экосистем (Кочеткова и др., 2019; Kuzmina et al., 2018, 2019; Solodovnikov, Shinkarenko, 2020). Достаточно широко спутниковые данные применяются и для мониторинга водохранилищ. Например, для анализа изменений морфометрических характеристик (Воробьев, Курбанов, 2021; Курбанов, Воробьёв, 2021; Курбатова, 2014; Лагута, Погорелов, 2019), мониторинга осушек (Кутузов, 2011; Шевердяев, Клещенков, 2019) и устьевых областей рек (Стародубцев, 2017; Шинкаренко, Солодовников, 2018), процессов переработки берегов (Баранова и др., 2016, 2020), чрезвычайных ситуаций (Константинова, Лупян, 2020; Терехов и др., 2020) и других задач. Цель настоящего исследования заключается в анализе динамики площадей водохранилищ Крымского п-ова с использованием спутниковых изображений и других открытых данных.

До строительства СКК полуостров обеспечивался за счёт собственных поверхностных и подземных вод, в том числе для орошения сельскохозяйственных угодий на площади около 70 тыс. га. После строительства канала орошаемые площади увеличились примерно в шесть раз, также решилась проблема водоснабжения восточной части полуострова. По этим причинам после прекращения подачи днепровской воды ситуация с обеспечением водой серьёзно ухудшилась (Иванкова, 2017).

Рис. 1. Местоположение водохранилищ. I — граница п-ова Крым; II — г. Севастополь; III — гидрографическая сеть; IV — водохранилища естественного стока; V — наливные водохранилища. 1–23 — номера водохранилищ (см. *табл. 2*)

Территория Крымского п-ова разделена на 10 водохозяйственных участков (ВХУ). Всего на полуострове более 1600 водотоков, более 300 озёр и лиманов, 15 водохранилищ естественного стока и восемь наливных водохранилищ (*рис. 1*, *табл. 1*), которые наполнялись из Северо-Крымского канала, более 1700 прудов (Схема..., 2016).

Наиболее крупные по проектному объёму — Чернореченское, Партизанское и Симферопольское водохранилища естественного стока, а также Межгорное и Фронтовое наливные водохранилища. Белогорское по объёму на треть уступает Партизанскому, но при этом имеет аналогичную проектную площадь.

Материалы и методы

В работе использовались спутниковые изображения пространственного разрешения 10–30 м, получаемые с космических аппаратов программы Landsat (Landsat-5 TM с 1984 по 2010 г., Landsat-7 ETM+ с 1999 по 2012 г. и Landsat-8 OLI) и Sentinel-2 (2015–2020). Среди различных источников открытых данных спутниковые изображения Landsat имеют достаточно высокое пространственное разрешение (30 м) при максимальном временном охвате. Изображения Sentinel-2 были приведены к разрешению 30 м.

Выделение водного зеркала основано на контролируемой классификации многоспектральных спутниковых изображений с включением данных, получаемых в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах спектра. В этих диапазонах находятся максимум поглощения водой и максимум отражения растительного покрова, благодаря чему прибрежная растительность достаточно чётко отделяется от водной поверхности. После классификации границы водных объектов проходят экспертную верификацию по спутниковым цветовым RGB-композитам (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий) с включением панхроматического канала Landsat, и в случае необходимости границы корректируются вручную (например, в зоне мелководья и свежих осушек). Далее границы полученных полигональных объектов проходят генерализацию для сглаживания их границ, а также устраняются ошибки геометрии. Данный подход успешно применялся авторами ранее для определения водного зеркала других объектов (Рулев и др., 2017; Шинкаренко, Солодовников, 2018; Шинкаренко и др., 2021). Использование различных индексов, например NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс), не позволило улучшить точность классификации (в первую очередь из-за ошибок на отмелях). Поскольку площадь водохранилищ связана с их объёмами и уровнями, то возможно их определение через площадь поверхности, определяемой по спутниковым данным, с помощью аппроксимации. Обычно функции связи площадей, объёмов и уровней водохранилищ приводятся в Правилах использования водных ресурсов (ПИВР). На сайте Государственного комитета по водному хозяйству и мелиорации республики Крым (https://gkvod.rk.gov.ru) и в СКИОВО имеются упоминания о разработке ПИВР только трёх водохранилищ: Симферопольского, Белогорского и Партизанского.

Всего проанализировано около 400 безоблачных изображений Landsat и около 100 — Sentinel-2A/B за май–ноябрь 1984–2020 гг. из общего архива примерно в 2900 и 1100 изображений соответственно. Большая часть водохранилищ (22 из 23) охватываются одним изображением Landsat (path/row 177/29), западная часть полуострова также отображается на изображениях path/row 178/29. Только Сокольское вдхр. не попадает на указанные изображения, поэтому оно в настоящей работе не анализировалось. Для получения спутниковых данных использовался портал Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey — USGS, https://earthexplorer.usgs.gov/), а также сервис «Вега» (Барталев и др., 2012), функционирующий в рамках Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015). Обработка спутниковых изображений и работа с полученными векторными картографическими слоями осуществлялась в программе QGIS версии 3.2, площади рассчитаны в местной системе координат МСК-90 (зона 1 — для Чернореченского вдхр., зона 2 — для остальных), картографические изображения приведены в проекции UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator) (зона 36N). Предварительная обработка спутниковых снимков заключалась в радиометрической калибровке и коррекции атмосферных искажений стандартными средствами согласно метаданным, представляемым вместе с изображениями.

Для анализа были отобраны восемь наиболее крупных водохранилищ естественного стока (Альминское, Бахчисарайское, Белогорское, Загорское, Партизанское, Симферопольское,

Тайганское и Чернореченское) и четыре наливных водохранилища (Межгорное, Феодосийское, Фронтовое, Юзмак (Ленинское)). Керченское вдхр. не включено в работу из-за недостаточного количества пригодных для анализа спутниковых изображений. Для каждого объекта получены от 50 до 80 значений площадей за период 1984–2020 гг. (всего более 1500 измерений), определены максимальная и минимальная площади и даты их наблюдения (*табл. 2*). С учетом того, что ошибка определения границы водоёмов при использованном подходе составляет примерно 15 м (половину пикселя), максимальная ошибка определения площади оказалась равной 4–10 % для разных водохранилищ. Многолетняя динамика площадей представлена значениями на сентябрь – октябрь каждого года. Это связано с наличием наибольшего числа безоблачных спутниковых изображений в эти месяцы, а также с периодом летне-осенней межени. Данные об объёмах водохранилищ на каждый квартал 2015–2019 гг. приводятся согласно информации, размещённой на сайте Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым (Доклады о состоянии и охране окружающей среды Республики Крым в 2013–2020 гг., https://meco.rk.gov.ru/ru/structure/60). Сведения из Государственного водного реестра получены в Росводресурсах. Показатели обеспеченности рассчитывались по формуле Крицкого – Менкеля в программе HydroStatCalc. Суммы осадков за гидрологический год определялись по данным CRU TS 4 (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/).

Таблица 2. Максимальная и минимальная площади водохранилищ Крыма по данным ДЗЗ

№	Название водохранилища	Площадь по ДЗЗ, га/% от НПУ		Дата наблюдения по ДЗЗ		Площадь при НПУ, га
		Максимум	Минимум	Максимум	Минимум	
Водохранилища естественного стока						
1	Альминское	83,9/98	21,4/25	10.05.1997	22.08.2012	86,0
2	Аянское	40,2/96	2,1/5	10.05.1997	22.08.1994	42,0
3	Балановское	49,8/112	11,3/28	10.05.1997	03.07.2020	40,7
4	Бахчисарайское	100,1/101	12,6/13	10.05.1997	21.09.2020	99,5
5	Белогорское	212,3/94	52,9/24	10.05.1997	03.10.1986	225,0
6	Загорское	161,4/103	14,4/9	22.09.1997	09.10.1994	156,0
7	Изобильненское	61/100	5,1/7	10.05.1997	09.10.1994	61,0
8	Кутузовское	10,1/107	0,5/5	10.05.1997	11.09.1984	9,4
9	Льговское	24,1/87	0,4/1	26.06.1998	03.10.1986	27,8
10	Партизанское	212,1/96	35,2/16	22.09.1997	23.09.1994	220,0
11	Симферопольское	309/97	58/18	10.05.1997	09.10.1994	317,0
12	Старокрымское	41,9/97	4,7/11	30.08.1997	03.10.1986	43,0
13	Счастливенское	71,5/102	7,7/11	10.05.1997	09.10.1994	70,0
14	Тайганское	197,4/100	13/7	10.05.1997	09.10.1994	196,8
15	Чернореченское	588,8/97	50,8/8	10.05.1997	22.08.1994	604,0
Наливные водохранилища						
16	Зеленоярское	39,7/78	11,2/22	14.09.1988	21.06.2018	51,0
17	Керченское	245,6/91	110,2/41	10.06.1988	09.09.2018	270,0
18	Межгорное	408,4/102	15,7/4	08.10.1997	08.11.2020	400,0
19	Самарли	128,1/95	78,4/58	16.07.2001	04.05.2018	135,0
20	Сокольское	–	–	–	–	65,0
21	Феодосийское	216,3/89	107/44	03.10.1986	16.10.2020	242,0
22	Фронтовое	635,6/99	131,1/20	04.10.2001	14.09.2020	645,0
23	Юзмак	172,5/81	65,7/31	15.09.1997	16.10.2020	212,0

Результаты и обсуждение

На основе обработки спутниковых изображений определены максимальные и минимальные площади водного зеркала крымских водохранилищ (см. *табл. 2*, *рис. 2*). Полученные значения максимальных площадей несколько отличаются от проектных (при НПУ) как в меньшую, так и в большую стороны. Это может свидетельствовать о превышении НПУ в отдельные периоды. В то же время присутствует неопределённость из-за возможных различий между параметрами местной системы координат при подсчёте площадей в программе QGIS и расчётами проектировщиков. На большинстве водохранилищ естественного стока максимальная площадь отмечена весной 1997 г. В этот год сумма осадков практически в 1,5 раза превышала среднемноголетнее значение, что положительно сказалось на водности рек полуострова. Наливные водохранилища наполняются из СКК, поэтому их уровень искусственно регулировался и не был связан с гидротермическими условиями. Тем не менее после 2001 г. близкие к НПУ значения наблюдались только на Фронтовом вдхр.

Рис. 2. Схемы водного зеркала водохранилищ: *а* — Тайганское; *б* — Бахчисарайское; *в* — Альминское; *г* — Белогорское; *д* — Загорское; *е* — Партизанское; *ж* — Симферопольское; *з* — Чернореченское; *и* — Межгорное; *к* — Феодосийское; *л* — Фронтовое; *м* — Юзмак. I — минимальная площадь; II — 08.11.2020; III — 14.09.2020; IV — 12.07.2020; V — 01.05.2020; VI — максимальная площадь

В 2020 г. в СМИ было множество сообщений о рекордно низком наполнении водохранилищ в Крыму. Из 15 водохранилищ естественного стока этот год стал рекордно маловодным только для Балановского и Бахчисарайского водохранилищ, на остальных минимальные площади отмечались в 1994 г. (суммарная площадь была на уровне 20 % от проектной) или в 1984–1986 гг. (см. *табл. 2*, *рис. 2*).

Рис. 3. Динамика площадей водохранилищ в 2019–2020 гг. Водохранилища естественного стока (*вверху*): I — Альминское, II — Бахчисарайское, III — Белогорское, IV — Загорское, V — Партизанское, VI — Симферопольское, VII — Тайганское, VIII — Чернореченское, IX — месячная сумма осадков; наливные водохранилища (*внизу*): I — Межгорное, II — Феодосийское, III — Фронтовое, IV — Юзмак. Широкие столбцы — площадь, узкие — осадки

В 2020 г., как и в 1984 г., общая площадь водохранилищ составила около 40 % проектной. Только в отличие от предыдущих лет в 2020 г. не было возможности восполнить дефицит воды за счёт СКК, поэтому осенью площадь четырёх крупнейших наливных водохранилищ составила всего 22 % от проектной (*рис. 3*). Стоит заметить, что низкая наполненность наливных водохранилищ (около 30 % площади от проектной) после прекращения подачи воды из СКК наблюдалась уже после 2016–2017 гг. (*рис. 4*, см. с. 233), причём площадь Фронтового вдхр. сократилась вдвое уже в 2014 г. (до 27 % проектной площади). В 2003–2013 гг. общая площадь наливных водохранилищ составляла в среднем 80–85 % от проектной, а осенью 2014 г. этот показатель снизился до 55 %, не превышая 30 % после 2017 г.

На *рис. 4* показана динамика среднегодовых площадей водохранилищ и средневзвешенных сумм осадков (в качестве веса использовалась площадь водосбора водохранилища). Для водохранилищ естественного стока характерна значимая корреляция площади с суммами осадков за гидрологический год на водосборах. Для Альминского, Белогорского, Загорского и Тайганского водохранилищ соответствующие коэффициенты корреляции равны 0,50–0,56 ($\alpha < 0{,}01$), для Бахчисарайского, Партизанского, Симферопольского и Черноречинского — 0,67–0,79 ($\alpha < 0{,}0001$). Кроме речного стока на уровни водохранилищ влияет забор воды. Поскольку в водном реестре отсутствуют сведения о заборе воды из водохранилищ, нам не удалось количественно оценить роль водопотребления в динамике площадей водного зеркала. Всего по Республике Крым в 2014 г. по сравнению с 2013 г. снизилось водопотребление более чем на 1 млн м^3, в основном за счёт прекращения подачи воды по СКК (Схема..., 2016). После перекрытия подачи днепровской воды из Белогорского и Тайганского водохранилищ осуществляется переброска воды в СКК по руслу р. Биюк-Карасу для наполнения наливных

водохранилищ восточной части полуострова (Схема..., 2016). Из Загорского вдхр. вода перебрасывается в Счастливенское, из Белогорского — в Тайганское, Старокрымское вдхр. подпитывалось из СКК, в 2020 г. вода из Тайганского вдхр. подавалась в Симферопольское, из-за этого наполняемость указанных водохранилищ также в меньшей степени зависит от поверхностного стока.

Рис. 4. Многолетняя динамика площадей водохранилищ. Водохранилища естественного стока (*вверху*): I — Альминское, II — Бахчисарайское, III — Белогорское, IV — Загорское, V — Партизанское, VI — Симферопольское, VII — Тайганское, VIII — Чернореченское, IX — годовая сумма осадков, X — суммарная площадь при НПУ, XI — среднемноголетняя сумма осадков; наливных водохранилищ (*внизу*): I — Межгорное, II — Феодосийское, III — Фронтовое, IV — Юзмак, V — Суммарная площадь при НПУ). Широкие столбцы — площадь, узкие — суммы осадков

Ввиду низкой доступности данных регулярных гидрологических наблюдений (в частности, наблюдений уровней воды) важную роль в мониторинге водных ресурсов крымских водохранилищ могут играть данные ДЗЗ. Зная связь площадей и объёмов водохранилищ, можно определить объём по актуальным спутниковым изображениям. Для этого необходимо сопоставить известные объёмы водоёмов (*рис. 5*, см. с. 234) и соответствующие им площади (*рис. 6*, см. с. 235), а затем аппроксимировать полученные кривые. В *табл. 3* представлены уравнения связей объёмов и площадей наиболее крупных водохранилищ Крыма, полученные аппроксимацией экспоненциальным уравнением и полиномом второй степени, а также коэффициенты корреляции при линейной связи.

Для Симферопольского вдхр. наиболее тесная связь между площадью и объёмом характерна для линейной зависимости ($R = 0{,}97$), для остальных предпочтительней полином второй степени (только у Тайганского вдхр. для обеих зависимостей R^2 практически не отличается). Поскольку в Докладах о состоянии и охране окружающей среды Республики Крым (https://meco.rk.gov.ru/ru/structure/60) приводятся данные по объёмам по кварталам, а площади определялись с разбегом в 1–2 мес, то возможны расхождения в датах наблюдения

этих величин, что может вносить погрешность. При наличии точных объёмов на даты спутниковых наблюдений возможно более точное определение уравнений связи площадей и объёмов. Кроме того, из-за накопления наносов в чашах водохранилищ реальные объёмы могли уменьшиться по сравнению с проектными при одних и тех же уровнях.

Рис. 5. Динамика объёмов водохранилищ Республики Крым по данным (https://meco.rk.gov.ru/ru/structure/60) в 2015–2019 гг. Водохранилища естественного стока (*вверху*): I — Альминское, II — Бахчисарайское, III — Белогорское, IV — Загорское, V — Партизанское, VI — Симферопольское, VII — Тайганское, VIII — доля объёма от НПУ; наливные водохранилища (*внизу*): I — Межгорное, II — Феодосийское, III — Фронтовое, IV — Юзмак, V — доля объёма от НПУ; 1–4 — кварталы. Широкие столбцы — площадь, узкие — доля объёма

Таким образом, спутниковые наблюдения площадей водохранилищ могут быть дополнением к традиционным наблюдениям уровней на гидрологических постах. На водоёмах без постоянного гидрологического мониторинга анализ площадей по спутниковым изображениям выступает единственным вариантом непрерывных наблюдений и ретроспективного анализа. Периодичность спутниковой съёмки высокого разрешения, достаточного для идентификации водного зеркала изучаемых водохранилищ, составляет 7–16 дней. Часть изображений будут непригодны для использования из-за облачности, но эту проблему помогут решить данные микроволновой спутниковой радиометрии, для которой облака не являются препятствием. (Например, радарные данные Sentinel-1 находятся в открытом доступе и на территорию Крыма обновляются с периодичностью 2–4 дня, охват с апреля 2014 г.). Для этого необходимо провести калибровку и разработать подход идентификации водного зеркала в условиях п-ова Крым на основе радарных данных. Разработанные карты водного зеркала могут стать опорной выборкой для обучения алгоритма классификации спутниковых радарных данных. Спутниковые изображения могут обрабатываться автоматически, что позволит проводить мониторинг без участия человека.

Рис. 6. Динамика площади и объёмов Симферопольского вдхр. в 2015–2020 гг. (*вверху*) и связь объёма и площади водохранилища (*внизу*): I — площадь, II — объём, III — фактические значения площади и объёма, IV — линейная аппроксимация; 1–4 — кварталы

Таблица 3. Связь площадей и объёмов водохранилищ

Название водохранилища	R	Экспонента		Полином	
		Уравнение	R^2	Уравнение	R^2
Водохранилища естественного стока					
Альминское	0,96	$0{,}087e^{0{,}0543x}$	0,83	$0{,}0004x^2 + 0{,}0857x - 3{,}5897$	0,92
Бахчисарайское	0,93	$0{,}105e^{0{,}046x}$	0,66	$0{,}0009x^2 + 0{,}0155x - 0{,}3315$	0,62
Белогорское	0,89	$3{,}722e^{0{,}0091x}$	0,55	$-2\cdot10^{-5}x^2 + 1{,}1222x - 1{,}9297$	0,41
Загорское	0,84	$8{,}694e^{0{,}0071x}$	0,13	$0{,}0018x^2 + 0{,}314x + 31{,}6010$	0,33
Партизанское	0,85	$5{,}250e^{0{,}0094x}$	0,66	$-0{,}0009x^2 + 0{,}5251x - 36{,}259x$	0,73
Симферопольское	0,97	$6{,}814e^{0{,}0055x}$	0,73	$0{,}0001x^2 + 0{,}0755x + 1{,}7476$	0,74
Тайганское	0,90	$0{,}826e^{0{,}0151x}$	0,56	$0{,}0003x^2 + 0{,}001x + 0{,}9513$	0,57
Наливные водохранилища					
Межгорное	0,97	$1{,}077e^{0{,}0099x}$	0,99	$0{,}0002x^2 + 0{,}0057x + 0{,}998$	0,98
Феодосийское	0,88	$2{,}813e^{0{,}007x}$	0,59	$0{,}0003x^2 + 0{,}0463x + 7{,}7057$	0,70
Фронтовое	0,90	$0{,}834e^{0{,}0062x}$	0,88	$0{,}0001x^2 + 0{,}0172x + 2{,}6842$	0,89
Юзмак	0,79	$1{,}220e^{0{,}0074x}$	0,52	$0{,}0002x^2 + 0{,}026x + 2{,}6083$	0,85

Заключение

В результате дешифрирования спектрозональных спутниковых изображений высокого разрешения Landsat и Sentinel картографировано водное зеркало 15 водохранилищ естественного стока и семи наливных водохранилищ Крымского п-ова в 1984–2020 гг. Разработанные геоинформационные слои позволили определить динамику площадей поверхности этих водных объектов, сопоставить её с годовыми суммами осадков и объёмами. На основе овер-

лейных операций определена частота наблюдения различных площадей водохранилищ. Картографирование площадей водохранилищ, в отличие от традиционного гидрологического мониторинга, позволяет определять осушки, частоту их затопления, продолжительность обсыхания, что очень важно для анализа состояния экосистем в зоне экотона «вода – суша». Также разновременные карты водного зеркала позволяют оценивать процессы переработки берегов.

Самым маловодным за период исследований был 1994 г., когда площадь водохранилищ естественного стока составила всего 20 % от проектной. В 2020 г. из-за засухи площадь этих водохранилищ составила около 40 % от проектной, аналогичная ситуация наблюдалась в 1984 г. Наиболее сильно водное зеркало сократилось у Бахчисарайского вдхр. (до 15 % проектной), в меньшей степени — у Альминского и Чернореченского. Установлена значимая корреляционная связь между годовыми суммами осадков и площадями водохранилищ. На наливных водохранилищах маловодье началось сразу после прекращения подачи воды из Днепра по Северо-Крымскому каналу. Площадь наливных водохранилищ к концу 2014 г. сократилась с 80 до 56 % от проектной, после 2017 г. не превышала 30 %, а в 2020 г. опустилась до 20–22 % от проектной. Площадь Межгорного вдхр. осенью 2020 г. не превышала 5 % от проектной, а Фронтового — 20 %.

Сопоставление площадей и объёмов водохранилищ позволило получить уравнения связи этих показателей. Таким образом, спутниковые данные могут стать основой для мониторинга объёмов водохранилищ при нерегулярных наблюдениях на гидрологических постах или их отсутствии. Спутниковые изображения позволяют оценивать динамику площадей с периодичностью от 7 до 16 дней при безоблачной погоде, наличие облаков может привести к отсутствию пригодных данных на какие-либо даты, особенно в холодное полугодие. Использование данных спутниковой микроволновой радиометрии позволит решить проблему получения необходимой информации при наличии облачности. Разработанные картографические слои могут служить базой эталонов водных поверхностей для разработки полностью автоматических методов идентификации водных объектов. В этом направлении будет лежать дальнейшее развитие методов спутникового мониторинга водных объектов.

Ввиду огромной роли водохранилищ в водоснабжении Крымского п-ова представляется важной задача актуализации сведений об объёмах водохранилищ. Большинство из них расположено в предгорной зоне, их питают горные речки, переносящие значительное количество влекомых и взвешенных наносов. Проблема заполнения чаши водохранилища наносами очень характерна для подобных условий. В этой связи можно предположить, что современные объёмы многих из рассмотренных водохранилищ отличаются от проектных. Решить этот вопрос поможет батиметрическая съёмка водохранилищ в период, когда их уровень близок к отметкам НПУ.

Работа выполнена в рамках темы Института космических исследований РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164), а также по теме научно-исследовательской работы Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН № 0713-2019-0001 с использованием инфраструктуры ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015) и возможностей информационного сервиса Вега (Барталев и др., 2012).

Литература

1. *Ануфриева Е. В.*, *Шадрин Н. В.*, *Шадрина С. Н.* История изучения биоразнообразия гиперсоленых водоемов Крыма // Аридные экосистемы. 2017. Т. 23. № 1(70). С. 64–71.
2. *Байков А. М.* Анализ существующей системы мониторинга окружающей природной среды автономной республики Крым (на примере мониторинга основных рек Крыма) // Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Сер.: География. 2009. Т. 22(61). № 2. С. 33–40.
3. *Баранова М. С.*, *Филиппов О. В.*, *Кочеткова А. И.*, *Брызгалина Е. С.* ГИС-технологии и спутниковые данные как инструменты мониторинга геодинамических процессов Волгоградского водохранилища // Географ. вестн. 2016. № 2(37). С. 148–160. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-2-148-160.

4. *Баранова М. С.*, *Кочеткова А. И.*, *Филиппов О. В.*, *Брызгалина Е. С.*, *Фотина О. С.*, *Михайлова Е. А.*, *Курыкин А. А.* Морфометрические характеристики устьевых абразионно-аккумулятивных пересыпей и заливов озерного участка Волгоградского водохранилища // Географ. вестн. 2020. № 1(52). С. 70–83. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-1-70-83.
5. *Барталев С. А.*, *Ершов Д. В.*, *Лупян Е. А.*, *Толпин В. А.* Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
6. *Богуцкая Е. М.*, *Косицкий А. Г.*, *Айбулатов Д. Н.*, *Гречушникова М. Г.* Средний многолетний сток рек юго-западной части Крымского полуострова // Водное хозяйство России. 2020. № 2. С. 37–51. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-3.
7. *Василенко В. А.* Крым: водный кризис и экологические проблемы // ЭКО. 2016. № 9(507). С. 60–78.
8. *Волкова Н. Е.*, *Захаров Р. Ю.* Управление водохозяйственной деятельностью на малых водоаккумулирующих сооружениях в республике Крым // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 2(78). С. 68–81. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.68-81.
9. *Воробьев О. Н.*, *Курбанов Э. А.* Оценка затопления растительного покрова в республиках Марий Эл и Чувашия при подъёме Чебоксарского водохранилища до отметки 68 м по данным ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 214–225. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-214-225.
10. *Гопченко Е. Д.*, *Овчарук В. А.*, *Романчук М. Е.* Метод расчета характеристик максимального стока рек при отсутствии материалов наблюдений (на примере рек Украины) // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 3. С. 260–267. DOI: 10.7868/S0321059615030062.
11. *Джамалов Р. Г.*, *Егоров Ф. Б.*, *Сафронова Т. И.* Ресурсы подземных вод и их роль в водоснабжении Крыма // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 596–602. DOI: 10.1134/S0321059618060056.
12. *Иванкова Т. В.* Рациональное использование водных ресурсов длительно эксплуатируемого Симферопольского водохранилища на реке Салгир, республика Крым // Строительство и архитектура. 2017. Т. 5. № 4. С. 212–218. DOI: 10.29039/article_5a3d2049b1e4a6.72412492.
13. *Каюкова Е. П.*, *Барабошкина Т. А.*, *Косинова И. И.* Ресурсный потенциал пресных вод Крыма. Статья 1 // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: Геология. 2014. № 4. С. 104–109.
14. *Каюкова Е. П.*, *Барабошкина Т. А.*, *Бударина В. А.* Ресурсный потенциал пресных вод Крыма. Статья 2. Водные ресурсы, экология и политика // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: Геология. 2016. № 1. С. 131–135.
15. *Кобечинская В. Г.*, *Ярош О. Б.*, *Ивашов А. В.*, *Апостолов В. Л.* Проблемы качества питьевой воды западной части Крыма // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 3(83). С. 50–62. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.3.50-62.
16. *Константинова А. М.*, *Лупян Е. А.* Анализ последствий прорыва дамбы Сардобинского водохранилища 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 261–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266.
17. *Кочеткова А. И.*, *Брызгалина Е. С.*, *Баранова М. С.*, *Фотина О. С.*, *Михайлова Е. А.*, *Курыкин А. А.*, *Строганов А. В.* Тенденция зарастания крупных заливов на месте устьевых областей рек Цимлянского водохранилища за период 1987–2019 гг. // Вестн. Ин-та комплексных исслед. аридных территорий. 2019. № 1-1(38). С. 149–151.
18. *Курбанов Э. А.*, *Воробьёв О. Н.* Ретроспективный анализ потери растительного покрова в Республиках Марий Эл и Чувашия после затопления Чебоксарского водохранилища по данным Landsat/MSS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 127–137. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-127-137.
19. *Курбатова И. Е.* Мониторинг трансформации Краснодарского водохранилища с использованием спутниковых данных высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 42–53.
20. *Кутузов А. В.* Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода – суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища) // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 64–72.
21. *Лагута А. А.*, *Погорелов А. В.* Изменение морфометрических характеристик Краснодарского водохранилища за период эксплуатации (1973– 2018 годы) // Интеркарто. Интергис. 2019. Т. 25. № 2. С. 5–15. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-5-15.
22. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
23. *Мазина С. Е.*, *Гопин А. В.*, *Николаев А. Л.* Оценка контаминации водного потока пещеры солдатской (Крым) // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 6. С. 722–729.

24. *Руднева И. И.*, *Шайда В. Г.* Сезонная динамика гиперсоленого озера Ойбург (Крым) как модель для изучения последствий изменения климата // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 426–437. DOI: 10.31857/S0321059620040173.
25. *Рулев А. С.*, *Шинкаренко С. С.*, *Кошелева О. Ю.* Оценка влияния гидрологического режима Волги на динамику затопления острова Сарпинский // Ученые записки Казанского ун-та. Сер.: Естественные науки. 2017. Т. 159. Кн. 1. С. 139–152.
26. *Соцкова Л. М.* Трансформация водных ресурсов Крыма под влиянием орошения // Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Сер.: География. 2011. Т. 24(63). С. 215–221.
27. *Стародубцев В. М.* Формирование нового дельтоподобного объекта в Капчагайском водохранилище на реке Или // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 1. С. 15–18. DOI: 10.7868/S0321059617010175.
28. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейнов рекРеспублики Крым. Кн. 1. Общая характеристика речных бассейнов, расположенных на территории Республики Крым. 2016. 175 с. URL: https://gkvod.rk.gov.ru/ru/structure/698.
29. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейнов рек республики Крым. Аналитический доклад «Целевое состояние водных объектов, расположенных на территории Республики Крым, основные цели и целевые показатели его достижения». 2017. 52 с. URL: https://gkvod.rk.gov.ru/ru/structure/698.
30. *Терехов А. Г.*, *Абаев Н. Н.*, *Лагутин Е. И.* Спутниковый мониторинг Сардобинского водохранилища в бассейне реки Сырдарьи (Узбекистан) до и после прорыва дамбы 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 255–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260.
31. *Тимченко З. В.* Обобщение наблюдаемых на реках Крыма максимумов и минимумов годового стока // Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Сер.: География. 2008. Т. 21(60). № 3. С. 348–358.
32. *Тимченко З. В.* Расчет характеристик изменчивости годового стока рек Крыма с известными расходами карстовых источников при отсутствии гидрометрических наблюдений // Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Сер.: География. 2009. Т. 22(61). № 2. С. 148–153.
33. *Шевердяев И. В.*, *Клещенков А. В.* Дешифрирование осушек Цимлянского водохранилища при колебаниях уровня // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Геоинформационные технологии и косм. мониторинг. 2019. № 4. С. 98–100. DOI: 10.23885/2500-123X-2019-2-4-98-100.
34. *Шинкаренко С. С.*, *Солодовников Д. А.* Формирование новой дельты Сырдарьи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 267–271. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-267-271.
35. *Шинкаренко С. С.*, *Солодовников Д. А.*, *Барталев С. А.* Гидрологическая ситуация на водохранилищах юга европейской части России в 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 248–254. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254.
36. *Юровский Ю. Г.*, *Каюкова Е. П.* Пресные воды Крыма (современные реалии) // Тр. Крымской академии наук. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. С. 13–22.
37. *Dublyansky Yu. V.*, *Klimchouk A. B.*, *Tokarev S. V.*, *Amelichev G. N.*, *Spötl C.* Groundwater of the Crimean Peninsula: A first systematic study using stable isotopes // Isotopes in Environmental and Health Studies. 2019. V. 55. Iss. 5. P. 419–437. DOI: 10.1080/10256016.2019.1650743.
38. *Kuzmina Zh. V.*, *Treshkin S. E.*, *Shinkarenko S. S.* Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region // Arid Ecosystems. 2018. V. 8. No. 4. P. 231–244. DOI: 10.1134/S2079096118040066.
39. *Kuzmina Zh. V.*, *Shinkarenko S. S.*, *Solodovnikov D. A.* Main Tendencies in the Dynamics of Floodplain Ecosystems and Landscapes of the Lower Reaches of the Syr Darya River under Modern Changing Conditions // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. No. 4. P. 226–236. DOI: 10.1134/S207909611904005X.
40. *Solodovnikov D. A.*, *Shinkarenko S. S.* Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin // Water Resources. 2020. V. 47. No. 6. P. 977–986. DOI: 10.1134/S0097807820060135.

Dynamics of the reservoirs areas of the Crimean Peninsula

S. S. Shinkarenko[1,2], D. A. Solodovnikov[3], S. A. Bartalev[1], A. A. Vasilchenko[2], A. A. Vypritskii[2]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru
[2] *Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS Volgograd 400062, Russia*
[3] *Volgograd State University, Volgograd 400062, Russia*

In 2020, in the south of the European part of Russia, a critical situation connected with the filling of reservoirs arose as a result of drought and low water levels on the rivers. The most difficult situation was observed on the Crimean Peninsula. After shutting off the supply of the Dnieper water through the North Crimean canal, the problem of acute water shortage arose on the peninsula. At the same time, the network of state hydrological monitoring of reservoirs is poorly developed in Crimea. Only one out of 34 hydrometeorological monitoring stations of the Crimean Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring is located on the reservoir. The State Water Register does not contain the characteristics of the remaining 22 reservoirs. The paper shows the possibilities of using satellite images Landsat, Sentinel-2 obtained over the period of 1984–2020 for monitoring the areas of reservoirs on the peninsula. We have analyzed the dynamics of the areas under study, revealed the relationship between the areas and the values of annual precipitation. The year of 1994 was the driest one: the natural runoff reservoirs were filled up to 20 %. In 1984 and 2020, the area of reservoirs made about 40 % of the project area. The loading reservoirs began to decrease immediately after the cessation of water supply from the canal in 2014, and they are currently filled up to 20 % of the project area. As a result of comparing the volumes and the corresponding areas of reservoirs, we have obtained equations for the relationship of these values. They can be used for estimating water supply on the basis of satellite observations.

Keywords: reservoir, Crimea, monitoring, remote sensing, Landsat

Accepted: 29.09.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241

References

1. Anufrieva E. V., Shadrin N. V., Shadrina S. N., History of research on biodiversity of Crimean hypersaline waters, *Arid Ecosystems*, 2017, Vol. 7, No. 1, pp. 52–58 (in Russian).
2. Baikov A. M., Separate lacks and ways of optimization of existing system of monitoring of a surrounding environment of Autonomous republic Crimea (on an example of system of monitoring of Republican committee of Autonomous republic Crimea on protection of a surrounding environment), *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Seriya: Geografiya*, 2009, Vol. 22(61), pp. 33–40 (in Russian).
3. Baranova M. S., Philippov O. V., Kochetkova A. I., Bryzgalina E. S., GIS technology and satellite data as tools for monitoring geodynamic processes in the Volgograd reservoir, *Geograficheskii vestnik*, 2016, No. 2(37), pp. 148–160 (in Russian), DOI: 10.17072/2079-7877-2016-2-148-160.
4. Baranova M. S., Kochetkova A. I., Filippov O. V., Bryzgalina E. S., Fotina O. S., Mikhajlova E. A., Kurykin A. A., Morphometric characteristics of estuarial abrasion-accumulative jumpers and bays of the Volgograd reservoir lake area, *Geograficheskii vestnik*, 2020, No. 1(52), pp. 70–83 (in Russian), DOI: 10.17072/2079-7877-2020-1-70-83.
5. Bartalev S. A., Ershov D. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Possibilities of satellite service VEGA using for different tasks of land ecosystems monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 49–56 (in Russian).
6. Bogutskaya E. M., Kositskiy A. G., Aybulatov D. N., Grechushnikova M. G., Mean Annual Runoff of the Rivers of the Crimean Peninsula Southwest, *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2020, No. 2, pp. 37–51 (in Russian), DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-3.
7. Vasilenko V. A., The Crimea: water crisis and environmental problems, *EKO*, 2016, No. 9(507), pp. 60–78 (in Russian).

8. Volkova N. E., Zakharov R. Yu., Water management in small water-accumulating facilities in The Republic of Crimea, *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2019, No. 2(78), pp. 68–81 (in Russian), DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.68-81.
9. Vorobiev O. N., Kurbanov E. A., Assessment of vegetation cover flooding in the republics of Mari El and Chuvashia in case of Cheboksary Reservoir rise to a mark of 68 m with the use of remote sensing, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 214–225 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-214-225.
10. Gopchenko E. D., Ovcharuk V. A., Romanchuk M. E., A method for calculating characteristics of maximal river runoff in the absence of observational data: case study of Ukrainian rivers, *Water Resources*, 2015, Vol. 42, No. 3, pp. 285–291 (in Russian), DOI: 10.7868/S0321059615030062.
11. Dzhamalov R. G., Egorov F. B., Safronova T. I., Groundwater resources and their role in water supply to Crimea, *Water Resources*, 2018, Vol. 45, No. 6, pp. 839–845 (in Russian), DOI: 10.1134/S0321059618060056.
12. Ivankova T. V., Rational use of water resources of the long exploited Simferopol reservoir on the Salgir river, Republic of Crimea, *Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, Vol. 5, No. 4, pp. 212–218 (in Russian), DOI: 10.29039/article_5a3d2049b1e4a6.72412492.
13. Kayukova E. P., Baraboshkina T. A., Kosinova I. I., Resource potential of the fresh waters of The Crimea. Art. 1, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2014, No. 4, pp. 104–109 (in Russian).
14. Kayukova E. P., Baraboshkina T. A., Budarina V. A., Resource potential of the fresh waters of The Crimea. Art. 2, Water resources, ecology and policy, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2016, No. 1, pp. 131–135 (in Russian).
15. Kobechinskaya V. G., Yarosh O. B., Ivashov A. V., Apostolov V. L., Issues of drinking water quality in the Western part of Crimea, *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2020, No. 3(83), pp. 50–62 (in Russian), DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.3.50-62.
16. Konstantinova A. M., Loupian E. A., Analysis of the consequences of the dam failure of the Sardoba Reservoir on May 1, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 261–266 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266.
17. Kochetkova A. I., Bryzgalina E. S., Baranova M. S., Fotina O. S., Mikhailova E. A., Kurykin A. A., Stroganov A. V., The tendency of overgrowing of large bays at the site of estuarine areas of the rivers of the Tsimlyansk reservoir for the period 1987–2019, *Vestnik Instituta kompleksnykh issledovanii aridnykh territorii*, 2019, No. 1-1(38), pp. 149–151 (in Russian).
18. Kurbanov E. A., Vorob'ev O. N., Retrospective analysis of vegetation cover loss in Republics of Mari El and Chuvashia after flooding of Cheboksarskaya dam from Landsat/MSS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 127–137 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-127-137.
19. Kurbatova I. E., Monitoring the transformation of Krasnodar Reservoir utilizing high resolution satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 42–53 (in Russian).
20. Kutuzov A. V., Monitoring of the Large Flat Water Reservoirs Using Remote Sensing Data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 6, pp. 64–72 (in Russian).
21. Laguta A., Pogorelov A., Change of morphometric characteristics of the Krasnodar water reservoir the period of its operation (1973–2018), *Interkarto. Intergis*, 2019, Vol. 25, No. 2, pp. 5–15 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-5-15.
22. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
23. Mazina S. E., Gopin A. V., Nikolaev A. L., Assessing the contamination of water flow in Soldatskaya Cave (Crimea), *Water Resources*, 2009, Vol. 36, No. 6, pp. 699–705 (in Russian), DOI: 10.1134/S0097807809060098.
24. Rudneva I. I., Shaida V. G., Seasonal dynamics of the hypersaline Lake Oiburg (Crimea) as a model for studying climate change effects, *Water Resources*, 2020, Vol. 47, No. 4, pp. 613–623 (in Russian), DOI: 10.1134/S0097807820040168.
25. Rulev A. S., Shinkarenko S. S., Kosheleva O. Yu., Assessment of the influence of the hydrological regime of the Volga River on the dynamics of flooding on Sarpinsky island, *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2017, Vol. 159, No. 1, pp. 139–151 (in Russian).
26. Sotskova L. M., Transformation of water resources of Crimea under the influence of an irrigation, *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Seriya: Geografiya*, 2011, Vol. 24(63), pp. 215–221 (in Russian).

27. Starodubtsev V. M., Formation of a new delta-like object in the Kapchagai reservoir on the Ili River, *Water Resources*, 2017, Vol. 44, No. 1, pp. 12–15 (in Russian), DOI: 10.1134/S009780781701016X.
28. *Scheme of the integrated use and protection of water bodies in the river basins of the Republic of Crimea. Book 1. General characteristics of river basins located on the territory of the Republic of Crimea*, 2016, 175 p., available at: https://gkvod.rk.gov.ru/ru/structure/698 (in Russian).
29. *Scheme of the integrated use and protection of water bodies in the river basins of the Republic of Crimea. Analytical report "Target state of water bodies located on the territory of the Republic of Crimea*, *main goals and target indicators of its achievement"*, 2017, 52 p., available at: https://gkvod.rk.gov.ru/ru/structure/698 (in Russian).
30. Terekhov A. G., Abaev N. N., Lagutin E. I., Satellite monitoring of the Sardoba Reservoir in Syr Darya River basin (Uzbekistan) before and after a dam collapses on May 1, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 255–260 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260.
31. Timchenko Z. V., Generalization the observations of maximum and minimum the year flowing for the rivers of Crimea, *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Seriya: Geografiya*, 2008, Vol. 21(60), No. 2, pp. 348–358 (in Russian).
32. Timchenko Z. V., Calculation of characteristics of the change of the annual runoff of the rivers of Crimea with the known consumption of the karst spring without the hydrometric observers, *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Seriya: Geografiya*, 2009, Vol. 22(61), No. 2, pp. 148–153 (in Russian).
33. Sheverdyaev I. V., Kleshchenkov A. V., Decoding dewatering areas of the Tsimlyansk reservoir by water level fluctuation, *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring*, 2019, No. 4, pp. 98–100 (in Russian), DOI: 10.23885/2500-123X-2019-2-4-98-100.
34. Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Formation of a new delta of Syr Darya, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 267–271 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-267-271.
35. Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Bartalev S. A., Hydrological situation in the reservoirs in the south of the European part of Russia in 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 18, No. 1, pp. 248–254 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-248-254.
36. Yurovskii Yu. G., Kayukova E. P., Fresh waters of Crimea (modern realities), *Trudy Krymskoi Akademii nauk*, Simferopol: IT "ARIAL", 2015, pp. 13–22 (in Russian).
37. Dublyansky Yu. V., Klimchouk A. B., Tokarev S. V., Amelichev G. N., Spötl C., Groundwater of the Crimean Peninsula: A first systematic study using stable isotopes, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2019, Vol. 55, Issue 5, pp. 419–437, DOI: 10.1080/10256016.2019.1650743.
38. Kuzmina Zh. V., Treshkin S. E., Shinkarenko S. S., Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region, *Arid Ecosystems*, 2018, Vol. 8, No. 4, pp. 231–244, DOI: 10.1134/S2079096118040066.
39. Kuzmina Zh. V., Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Main Tendencies in the Dynamics of Floodplain Ecosystems and Landscapes of the Lower Reaches of the Syr Darya River under Modern Changing Conditions, *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 9, No. 4, pp. 226–236, DOI: 10.1134/S207909611904005X.
40. Solodovnikov D. A., Shinkarenko S. S., Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin, *Water Resources*, 2020, Vol. 47, No. 6, pp. 977–986, DOI: 10.1134/S0097807820060135.