

УДК 556.555.6(1-924.71)

Гречушников М.Г.¹, Косицкий А.Г.², Айбулатов Д.Н.³, Школьный Д.И.⁴, Алексеева А.А.⁵, Карашова М.И.⁶

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТОКА ВОДЫ И ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ ЧЕРНОРЕЧЕНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Чернореченское водохранилище является главным источником водоснабжения г. Севастополя. Город-герой Севастополь, имеющий Федеральное значение, испытывает сложную ситуацию с обеспечением питьевой водой. В число источников водоснабжения входят поверхностные воды (Чернореченское водохранилище – 44 млн м³/год) и подземные воды (Инкерманский, Орловский, Бельбекский и Родниковский подземные водозаборы – 10, 4, 1,3 и 1,2 млн м³/год соответственно, а также несколько водозаборов местного значения с низкой производительностью). Использование подземных вод сопряжено с рядом проблем, в частности с повышенной жесткостью и минерализацией воды, пескованием скважин, опасностью засоления и необходимостью переутверждения запасов. Поэтому основным источником водоснабжения города является Чернореченское водохранилище. Однако использование поверхностных вод также сопряжено с рядом проблем, в частности с существенной зависимостью водоотдачи от водности года: в маловодный год она в 2 раза ниже, чем в год средней водности [Постановление ..., 2017].

Из-за дефицита пресной воды и при наличии перспектив курортного развития региона рассматриваются проекты строительства и использования новых водоемов (карьеры у пос. Инкерман, у г. Гасфорт, строительство водохранилища в Камышловской балке) [Иванов с соавт., 2009]. Однако предлагаемые решения пока остаются на стадии проектов. В числе проблем использования Чернореченского водохранилища отмечают его заиливание и увеличение площади испаряющей поверхности.

Ключевые слова: оценка трансформации стока воды, масштабов заиливания водохранилища, уточнение его батиметрических характеристик

Материалы и методы исследования. Чернореченское водохранилище расположено в юго-восточной части Байдарской долины и функционирует с 1956 г. С увеличением потребностей г. Севастополя в питьевой воде в 1979–1984 гг. плотину нарастили, общий объем водохранилища увеличился с 33,2 до 64,2 млн м³, а полезный составил 61,2 млн м³. Нормальный подпорный уровень (НПУ) водохранилища составляет 261 м абс., максимальная глубина – 31,7 м; средняя глубина – 10,7 м; проектная площадь зеркала при НПУ – 6,04 км² [Справочник ..., 1988]. Среднесуточная подача воды из водохранилища достигает 120 тыс. м³ (около 70% всей подаваемой в город воды) через отводящий канал, откуда по естественному руслу р. Черная поступает до гидроузлов № 2 (25,5 м, расположенного в районе села Нижнее Черноречье) и № 14 (в 6 км ниже по течению реки Черной от гидроузла № 2 в районе села Хмельницкое, рис. 1). Далее вода подается на очистные сооружения (пос. Штурмовое) по водоводам.

Морфологически сложное русловое Чернореченское водохранилище осуществляет многолетнее

регулирование стока выпадающих в него шести водотоков: р. Черная с притоком, р. Узунджа, р. Арманка, р. Календа, р. Боса, р. Бага Верхняя, р. Бага Нижняя (см. рис. 1). Река Черная относится к группе рек северо-западного склона главной гряды Крымских гор. Верхняя часть ее бассейна располагается на западных склонах горной гряды с расчлененным рельефом, ниже река прорезает Байдарскую долину [Ресурсы ..., 1973]. Средний многолетний (за период работы водохранилища) расход воды р. Черная выше водохранилища по данным наблюдений водомерного поста, расположенного в с. Родниковское, составляет 1,7 м³/с. Притоки водохранилища имеют паводочный режим с преобладанием стока в ноябре–апреле (85%), но даже в меженный период расходы рек при экстремальных паводках могут увеличиваться на порядок и более. Основными источниками питания рек в Байдарской долине являются снегово-дождевое, подземное и смешанное. Долины притоков сложены известняками, в верховьях покрыты лесом, ниже склоны долин пологие и распаханые. Средний многолет-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, вед. науч. с., канд. геогр. н.; ИВП РАН, лаборатория глобальной гидрологии, ст. науч. с.; e-mail: allavis@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: alexhydro@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: gidroden@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, науч. с.; e-mail: thabigd@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, студент; e-mail: anna-artemovna@yandex.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, студент; e-mail: m.karash@yandex.ru

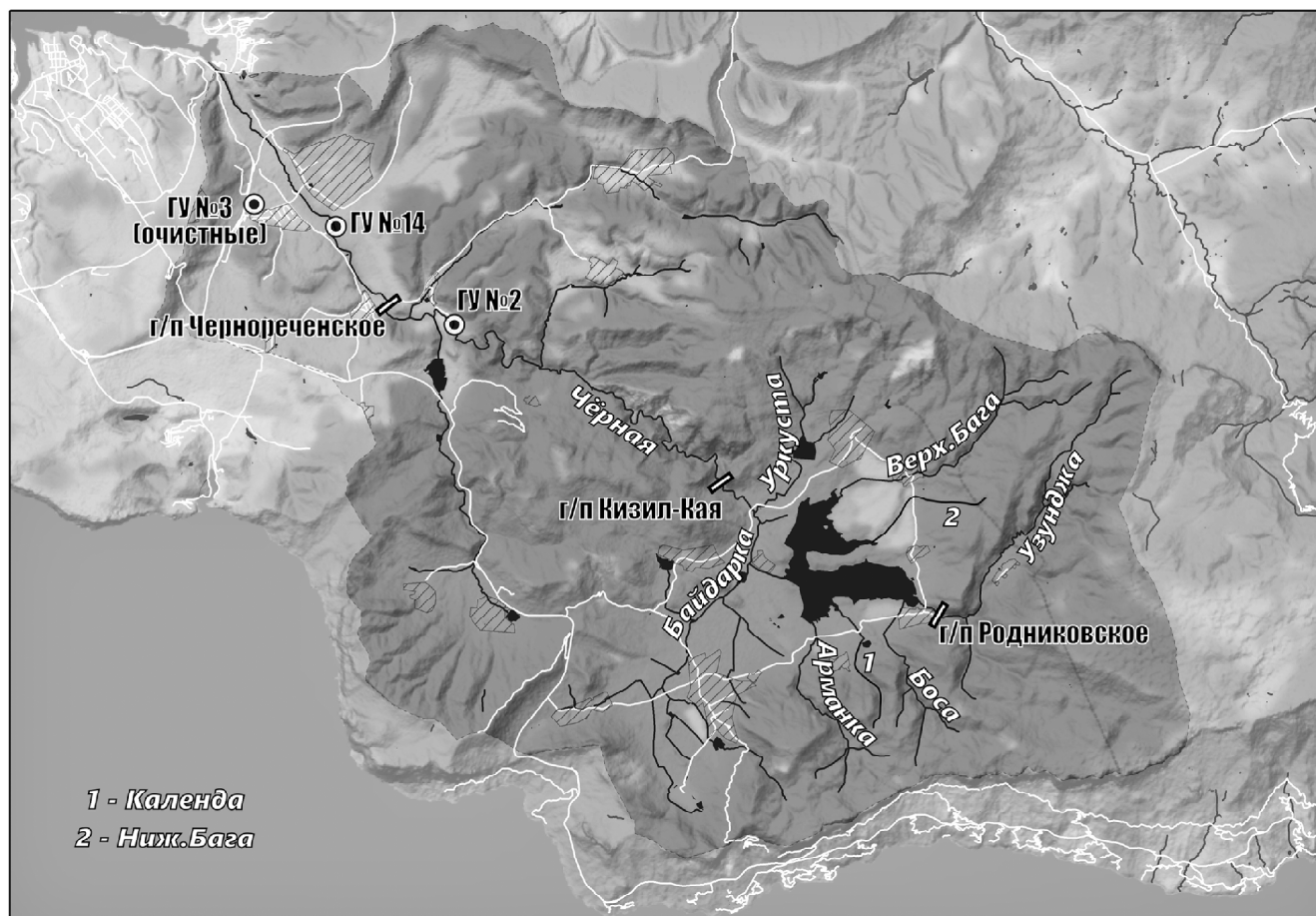


Рис. 1. Ситуационный план бассейна р. Черной и Чернореченского водохранилища

Fig. 1. Situational plan of the Chernaya River basin and the Chernorechensk reservoir

ний расход воды р. Черная ниже Чернореченского водохранилища (по данным наблюдений на гидрологическом посту у горы Кизил-Кая, приведенным к многолетнему периоду после создания водохранилища) составляет $2,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

В ходе комплексной экспедиции кафедры гидрологии суши в феврале 2018 г. была произведена батиметрическая съемка Чернореченского водохранилища при содействии ГУПС «Водоканал». Промеры производились эхолотом модели Garmin. Катер на малом ходу выполнял съемку косыми галсами по трек, указанному на схеме (рис. 2). Уровень водохранилища на дату промерных работ определен нивелировкой с использованием отметки НПУ, нанесенной на отмостку плотины.

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам произведенных в ходе экспедиции промерных работ построена карта глубин (см. рис. 2, А) и уточнены батиметрические кривые водоема (см. рис. 2, Б; 2, В).

Для расчетов объема заиления и трансформации стока Чернореченским водохранилищем использованы данные Росгидромета, опубликованные в гидрологических ежегодниках. Основная задача водохранилища – перераспределение стока для гарантированной подачи воды потребителям в маловодные периоды. На рис. 3 представлено изменение

внутригодового распределения стока воды р. Черная на постах Родниковское, Кизил-Кая и Чернореченское. Хорошо заметно уменьшение зимнего стока ниже плотины (посты Кизил-Кая и Чернореченское) в 1,5 раза (см. рис. 3,Б) и существенное увеличение стока в межень для обеспечения потребностей руслового водозабора, расположенного между постами Кизил-Кая и Чернореченское, закономерно имеющего максимум в летний период. Незначительная разница зимнего стока постов Родниковское и Кизил-Кая означает, что практически весь объем паводочного стока аккумулируется водохранилищем для поддержания запасов воды.

Несмотря на существенные внутригодовые изменения стока воды, среднегодовые значения мутности воды на посту Чернореченское выраженного тренда не имеют, что свидетельствует о восстановлении стока взвешенных наносов между плотиной и этим створом, поскольку река прорезает Чернореченский каньон. Измерение мутности воды на ближайшем к плотине посту Кизил-Кая не производилось, что затрудняет оценку баланса наносов.

При сопоставлении полученных промерных данных, приведенных к НПУ с проектными, выявлено, что за 62 года существования водохранилища объем заиления составил $4,82 \text{ млн м}^3$, что составляет около 7,9% его полезного объема.

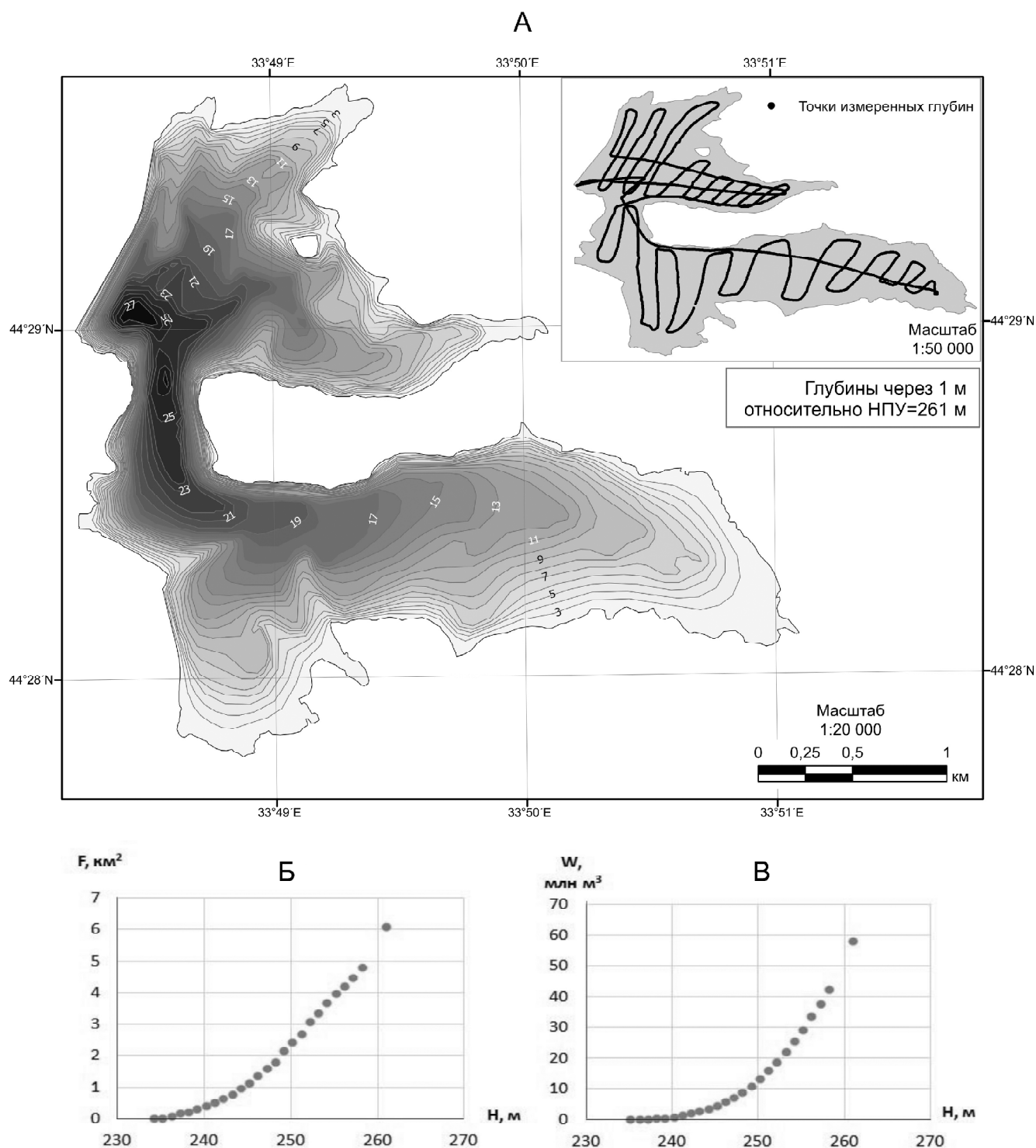


Рис. 2. Схема глубин Чернореченского водохранилища в изобатах (А), площадьная (Б) и объемная (В) по данным промеров 2018 г.

Fig. 2. The scheme of the depths of the Chernorechensk reservoir in isobaths (A), areal (B) and volume (C) according to 2018 surveying

Заполнение ложа водохранилища происходит несколькими источниками: это отложение взвешенных и влекомых наносов, которые приносят притоки, продукты абразии берега, накопление автохтонного органического вещества, продуцируемого экосистемой (распад высшей водной растительности, рост и отмирание планктонных форм). Данный вопрос изучен недостаточно, имеется мало публика-

ций, посвященных изучению вклада различных составляющих заиления для разнотипных водохранилищ. Согласно балансам взвешенных веществ, рассчитанным для водохранилищ волжского каскада, основным источником поступления наносов является береговая абразия и эрозия ложа: от 57% в Угличском до 87% в Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах. Всего же на дне водоемов накаплива-

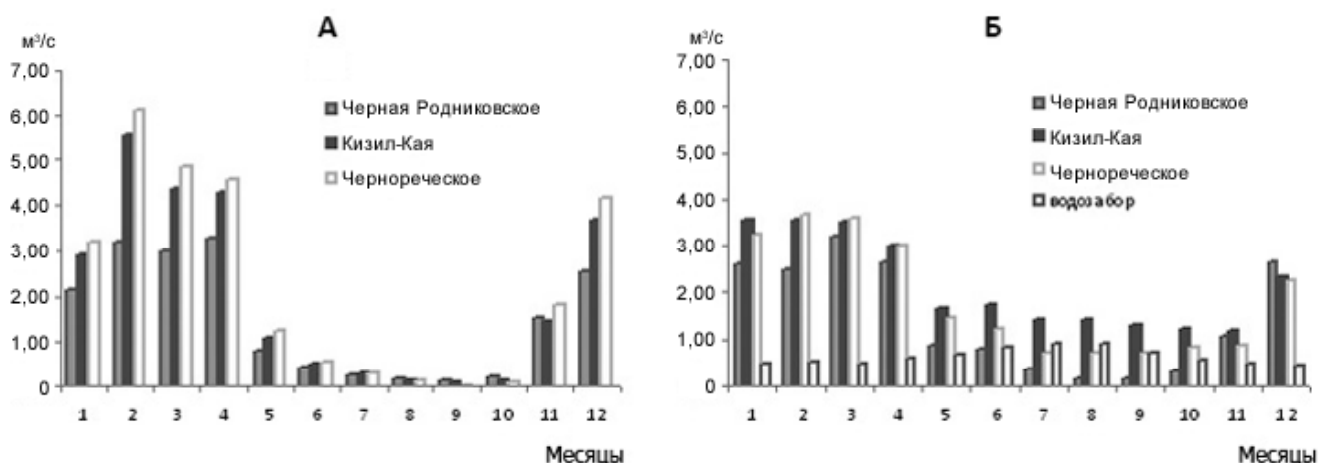


Рис. 3. Внутригодовое распределение стока р. Черная на г. п. Родниковское (выше водохранилища), Кизил-Кая и Чернореченское (площади водосбора 47,6, 197 и 342 км² соответственно): А – осреднение за период до строительства водохранилища (1950–1955), Б – после строительства (1963–1975)

Fig. 3. Intra-annual distribution of the Chernaya River runoff at Rodnikovskoe (upstream the reservoir), Kizil-Kaya and Chernorechensk gauging stations (the catchment areas 47,6, 197 and 342 km², respectively): А – average over the period before the reservoir construction (1950–1955), В – after reservoir construction (1963–1975)

ется от 62 до 96% от общего количества поступающего минерального и органического материала, источником которого является береговая абразия, приток с водосбора и продукция экосистемы водоемов. Причем из них 10–50% приходится на тонкодисперсные взвеси, поступающие с речным стоком и продукцией экосистемы. Сброс через гидросооружения оценивается от 4–5% в Рыбинском и Куйбышевском (коэффициент водообмена K_v соответственно 1,27 и 4,11), до 40% в сильнопроточных Чебоксарском и Саратовском водохранилищах (K_v 19,8 и 18 соответственно) [Законнов, 2016; Эдельштейн, 1998]. Экспериментальные исследования показали, что в слабопроточных относительно глубоководных водохранилищах осадконакопление происходит существенно интенсивнее.

Наименьшее содержание взвешенных веществ в Чернореченском водохранилище наблюдается в осенне-зимний период, когда низкие температуры воды лимитируют развитие планктонных форм. В период с марта по июль содержание взвешенных веществ в водах водохранилища изменяется мало (3 мг/л) и близко к среднепогодному значению, а в июле–октябре наблюдается увеличение этого показателя до 4 мг/л, обусловленное сезонными вспышками развития фитопланктона [Артеменко с соавт., 2005]. Для проточных водохранилищ волжского каскада при содержании взвешенных веществ 8 мг/л и более скорость осадконакопления оценивается от 3,3 до 9,1 мм/год [Законнов, Законнова, 2008]. Осадконакопление за 62 года в глубоководной зоне слабопроточного Чернореченского водохранилища площадью порядка 4 км² при объеме заиления 4,82 млн м³ оценивается 19 мм/год. Ниже приведена попытка оценить составляющие осадконакопления водохранилища.

Согласно данным рекогносцировки при выполнении промерных работ на Чернореченском водо-

хранилище не выявлено участков с сильной абразией берега. В восточной наиболее мелководной части водоема, куда впадают наиболее крупные притоки, берег можно охарактеризовать как аккумулятивный из-за поступления твердого стока. Однако из-за значительных колебаний уровня воды в результате ежегодной сработки ее запасов и межгодовых колебаний водности притока (в декабре 2014 года объем водохранилища сократился до 7,16 млн м³ [http://www.c-inform.info/news/id/16340/], рис. 4) возможна абразия и переформирование берегов с аккумуляцией в наиболее глубоководной части.

Отмечено важное действие абразионной деятельности водохранилищ со значительными внутри- и межгодовыми колебаниями уровня воды. На примере Рыбинского водохранилища показано, что количество автохтонной взвеси данного происхождения может быть сопоставимо с количеством вещества, поступающего при абразии [Зиминова, Курдин, 1968]. Поскольку регулярные наблюдения за переформированием берегов Чернореченского водохранилища не производятся, оценку этой составляющей осадконакопления можно произвести методом аналогии. По материалам наблюдений на Можайском водохранилище за 10 лет средний объем размыва слабоабразионного берега составил в среднем 1,6 (с колебаниями от 0,5 до 2 м³) на один погонный метр, для среднеабразионного берега средний объем размыва породы 3,2 м³ на погонный метр, а размыв сильноабразионного берега в среднем составил 6,1 (от 4 до 9) м³ на один погонный метр берега [Комплексные ..., 1979]. Однако последний тип берегов с песчаными обрывами и оползнями на Чернореченском водохранилище отсутствует. При преобладании известняковых пород в Байдарской долине для расчета примем среднюю величину абразии 3,2 м³ на один погонный метр. При длине берегов, потенциально подверженных размыву при



Рис. 4. Фрагменты снимков с различным наполнением водохранилища: высокий (слева) и низкий (справа) уровень

Fig. 4. Fragments of space images with different reservoir storage: high (left) and low (right) level

волнении (около 17 км за исключением укрепленной плотины), за 62 года существования водохранилища данная составляющая объема осадконакопления оценивается в 3,4 млн м³. Известно, что с течением времени абразия берегов уменьшается при выработке устойчивого профиля клифа и отмели, однако увеличение отметки НПУ на 8 м и значительные внутригодовые и межгодовые колебания уровня воды могли способствовать интенсификации этого процесса.

Сток взвешенного вещества с водосборной площади водохранилища можно оценить, используя данные о среднегодовом модуле стока наносов по данным на посту Родниковское р. Черная. Среднегодовой модуль стока взвешенных наносов за период 1963–1980 гг. составил для этого пункта 10 т/км² [Многолетние ..., 1985]. При площади водосбора водохранилища 190 км², среднем объемном весе илистых отложений 0,56 т/м³ [Комплексные ..., 1979] за 62 года существования водохранилища объем данной составляющей осадконакопления составил 0,21 млн м³.

Более сложной задачей является определение вклада переноса материала во влекомой форме в баланс наносов водохранилища. Крупнообломочные отложения выносятся из русловой сети только в высокие паводки и аккумулируются в местах резкого падения уклонов – в том числе, на приустьевых участках. Небольшие размеры рек приводят к тому, что руслоформирующие отложения перемещаются в основном при резких увеличениях расходов воды и переходе части отложений во взвешенное состояние, а формирование и движение ленточных гряд и рифелей возможно только на ограниченных участках длины русловой сети. Таким образом, при характерных для русловой сети территории больших уклонах количественные методы подсчета влекомых наносов будут иметь крайне высокую погрешность. Исследования показывают, что повышение базиса эрозии на притоках при создании водохранилища приводит к увеличению аккумуляции наносов

в нижнем их течении, в первую очередь – в зоне переменного подпора [Бабич с соавт., 2018], ярко выраженной у Чернореченского водохранилища.

Исследования, проводившиеся на мониторинговых участках в восточных районах Горного Крыма [Клюкин, 1996; 2005], показали, что в целом только 8% от общего количества наносов любого генезиса достигают замыкающих створов водотоков – остальные 92% аккумулируются по длине эрозионно-русловой сети. Рассчитанная в цитируемых работах средняя скорость денудации в руслах рек и временных водотоков во флишевых горных ландшафтах Крыма составляет около 4,3 мм/год, что в пересчете на общую длину русловой сети на водосборе водохранилища составляет около 600 т/год наносов непосредственно руслового генезиса. В целом это значение согласуется с характерными для горных территорий региона пропорциями между стоком взвешенных и влекомых наносов (по данным [Крыленко с соавт., 2006], доля влекомых наносов в общем стоке наносов составляет около 20–30%). Следовательно, суммарный приток взвешенных и влекомых наносов в водохранилище можно оценить в 0,28–0,31 млн м³.

Как отмечалось выше, по данным [Артеменко с соавт., 2005] внутригодовые изменения содержания взвешенных веществ в воде водохранилища характеризуются хорошо выраженной сезонной неоднородностью и обусловлены в основном развитием планктона. Наименьшие значения характерны для осенне-зимнего периода, когда низкая температура воды лимитирует развитие планктонных форм. Однако при расчете этой составляющей осадконакопления следует принимать во внимание то, что 80% продукции фитопланктона быстро минерализуется, во взвесах остается 20% [Комплексные ..., 1979]. Результаты регулярных наблюдений за продукцией фитопланктона на Чернореченском водохранилище в открытых источниках отсутствуют. Косвенно можно предположить, что водохранилище относится к мезотрофному типу, поскольку дефицита биогенных

элементов не наблюдается. Содержание фосфатов, согласно [Артеменко с соавт., 2005], не превышает 0,15 мг/л. Авторы отмечают, что «замкнутый характер внутригодовой динамики показателя свидетельствует о хорошем состоянии экосистемы Чернореченского водохранилища и об отсутствии склонности к эвтрофикации его вод». Для Можайского водохранилища, по данным регулярных измерений в его центральной части (Красновидовский плес), в среднем количество взвешенных веществ составляет около 4 мг/л, наибольших величин этот показатель достигает во время развития фитопланктона (7–8 мг/л). Среднегодовой слой осадков на Можайском водохранилище оценивается от 0,48 см [Комплексные ..., 1979] до 0,98 см в год (неопубликованные данные Красновидовской УНБ МГУ, 2015 г.), при этом доля фитопланктона в осадконакоплении оценивается не более чем в 7%. Более детальные исследования показали, что вклад продукции фито- и зоопланктона в приходную часть баланса взвешенных веществ изменяется от 2 до 63%, увеличиваясь в периоды усиления стратификации в летний период [Кременецкая с соавт., 2013]. Но принципиальное отличие рассматриваемых водоемов состоит в отсутствии ледостава на Чернореченском водохранилище, с чем может быть связана большая доля продукции планктона в осадконакоплении. Если принять, что ледостав на Можайском водохранилище продолжается в среднем с середины ноября по середину апреля (т. е. около 5 месяцев), и учесть географическое положение Чернореченского водохранилища, то при схожей интенсивности продукционных процессов возможно пропорциональное увеличение роли планктона в осадконакоплении Чернореченского водохранилища до 15–20%. Значительных зарослей макрофитов из-за большой относительной глубоководности нет ни в том, ни в другом водоеме, поэтому этой составляющей можно пренебречь.

При расчетах осадконакопления необходимо учитывать сброс взвешенных веществ в нижний бьеф. К сожалению, данные о взвешенных веществах на ближайшем к плотине Чернореченского водохранилища посту Кызыл-Кая отсутствуют, а измерения на посту Чернореченское (Хмельницкое) не могут характеризовать сброс из водохранилища, поскольку до этого поста река пересекает Чернореченский каньон. Согласно [Догановский, Орлов, 2011], транзитная часть наносов мелких фракций, сбрасываемых из водохранилища при паводках, в долях от общего объема наносов для равнинных водотоков составляет в среднем $\delta=0,3-0,4$. Однако при соотношении объема притока воды и объема Чернореченского водохранилища равном 0,1 транзитом взвешенных наносов возможно пренебречь, поскольку более 99% удерживается в водоеме.

Если принять, что объем заиления, определенный по разнице проектного объема и результатов промеров, составляет 4,82 млн м³, а суммарное заиление притоком взвешенных веществ и продукта-

ми абразии берега, определенные выше, составляют 76%, то 24% объема осадконакопления связано с продуцированием фитопланктона. Данный результат отличается от составляющих баланса взвешенного вещества на мезотрофно-эвтрофном Можайском водохранилище, где на долю фитопланктона приходится 6,9% от суммарного заиления [Комплексные ..., 1979]. Причины такого различия могут быть в недоучете осадконакопления продуктов абразии берегов или в недоучете поступления наносов с водосборной площади, поскольку для рек данного региона характерна весьма большая изменчивость водного и твердого стока в зависимости от фазы водного режима. Так, среднегодовая мутность воды р. Черная выше водохранилища составляет 11 г/м³ при интервале изменений от 2,6 до 60, при этом наибольшая срочная мутность изменяется в пределах от 17 до 1100 г/м³. К тому же основной приток водохранилища р. Черная, имеющий площадь водосбора равную около 1,4 площади водосбора водохранилища, питается подземными водами и имеет закарстованный бассейн. Для коррекции притока взвешенных веществ выполнены расчеты с модулем стока наносов с неизученной части водосбора, принятой по аналогу: р. Коккозка (среднегодовой модуль стока наносов 30 т/км²). Если принять, что 142,4 км² водосборной площади водохранилища имеют втрое больший среднегодовой модуль стока наносов, то эта составляющая их баланса возрастает с 4,5% до 9,8% соответственно, а суммарный приток наносов в водохранилище может составлять 0,66–0,76 млн м³. Следовательно, доля автохтонного заиления может составлять 14–16%, что согласуется с оценкой, приведенной выше.

Выводы:

- Чернореченское водохранилище существенно изменяет внутригодовой режим стока воды, аккумулируя паводочный сток с целью обеспечения водозабора в период низкой летней межени;
- существенных изменений среднегодовых значений мутности воды р. Черной в створе Чернореченское не выявлено;
- суммарное заиление притоком взвешенных веществ и продуктами абразии берега, составляют 76%, 24% объема осадконакопления связано с продуцированием фитопланктона;
- темпы заиления Чернореченского водохранилища оцениваются порядка 1,9 см в год. Это означает, что за 50 лет заиление составит менее 1 м в том случае, если не произойдет значительного увеличения притока взвешенных веществ с водосбора водохранилища, что возможно при активном освоении его водосборной площади – строительстве, распашке и других мероприятиях;
- для стабилизации ситуации требуется максимальное соблюдение охранных мероприятий и ограничение антропогенного воздействия в бассейне водохранилища. Значительная доля автохтонного заиления указывает на необходимость поддержания численности рыб-планктонофагов.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников ГУПС «Водоканал» за помощь и содействие в организации промерных работ на Чернореченском водохранилище, а также сотрудника НПП «ФОРТ XXI» Шумаева Р.В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артеменко В.М., Ильин Ю.П., Кучеренко В.С., Рябинин А.И., Боброва С.А., Гуцалюк А.Н., Мальченко Ю.А., Салтыкова Л.В. Гидрохимический режим и микроэлементный состав вод Чернореченского водохранилища в 1991–2004 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Вып. 12. Севастополь, Т. 12. Севастополь, 2005. С. 129–149.
- Бабиц Д.Б., Виноградова Н.Н., Иванов В.В., Коротаев В.Н., Чалова Е.Р. Типизация и динамика устьев рек, впадающих в водохранилища // Геоморфология. 2018. № 1. С. 33–44.
- Догановский А.М., Орлов В.Г. Сборник задач по определению основных характеристик водных объектов суши (практикум по гидрологии). СПб.: РГТУ, 2011. 315 с.
- Законнов В.В. Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Труды ИБВВ РАН. Вып. 75(78). 2016. С. 30–40.
- Законнов В.В., Законнова А.В. Географическая зональность осадконакопления в системе водохранилищ Волги // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 2. С. 105–111.
- Зиминова Н.А., Курдин В.П. Формирование рельефа и грунтов мелководий Рыбинского водохранилища // Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах. Л., 1968. С. 56–71.
- Иванов В.А., Прусов А.В., Демидов А.Н., Миньковская Р.Я., Шестопалов В.М. Водный баланс Севастопольского региона, водные ресурсы и их увеличение при строительстве водохранилища в балке Темной // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: 36. наук. пр. Севастополь, 2009. Вип. 17. С. 48–59.
- Клюкин А.А. Баланс наносов в низкогорье Крыма // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 2. С. 49–58.
- Клюкин А.А. Баланс наносов в бассейне р. Ворон (Крымские горы) // Геоморфология. 1996. № 1. С. 88–96.
- Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище. М.: Изд-во Моск ун-та, 1979. 467 с.
- Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В., Соколов Д.И., Ломов В.А. Влияние стратификации на седиментационные потоки в долинном водохранилище // Вестник РФФИ. № 6(78). 2013 г. С. 47–52.
- Крыленко В.И., Крыленко И.В., Крыленко В.В., Дзаганья Е.В. О влиянии морфометрических характеристик малых горных рек на сток наносов. Донецк: ООО Экотехнология, 2006. 65 с.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоздат, 1985. Т. II. Вып. 3. 361 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР / Крым. Л.: Гидрометеоздат, 1973. Т. 6. Вып. 4. 848 с.
- Справочник водохранилищ СССР. Часть I. Водохранилища объемом 10 млн м³ и более. М.: Союзводпроект, 1988. 323 с.
- Эдельштейн К.К. Водохранилища России. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
- Электронный ресурс:
Постановление Правительства Севастополя от 02.03.2017 № 165-ПП «Об утверждении схемы водоснабжения и водоотведения города Севастополя на период до 2021 года с учетом перспективы до 2035 года» [Электронный ресурс]. URL: <https://sevastopol.gov.ru/docs/253/32739/> (дата обращения 02.07.2018).
- Чернореченское водохранилище ежедневно пополняется водой на 70–80 тысяч кубометров – правительство Севастополя [Электронный ресурс]. URL: <http://www.c-inform.info/news/id/16340/> (дата обращения 05.07.2018).

Поступила в редакцию 09.08.2018
После доработки 12.02.2019
Принята к публикации 12.09.2019

M.G. Grechushnikova¹, A.G. Kositsky², D.N. Ajbulatov³,
D.I. Shkolny⁴, A.A. Alekseeva⁵, M.I. Karashova⁶

TRANSFORMATION OF WATER RUNOFF AND SEDIMENTATION IN THE CHERNORECHENSK RESERVOIR

Basing on the materials of surveying carried out in February 2018, the morphometric parameters of the Chernorechensk reservoir, the main source of drinking water in Sevastopol, were defined more precisely. It was found that for 62 years of the reservoir's existence, the volume of silting amounted to 4,82 million m³, which is about 7,9% of its effective storage. Sedimentation rate in the deep water zone of the Chernorechensk reservoir with an area of about 4 km² is about 19 mm per year. According to the estimates of various

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Leading Scientific Researcher, PhD. in Geography; Institute of water problems of the RAS, Laboratory of Global Hydrology, Senior Scientific Researcher; e-mail: allavis@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Associate Professor, PhD. in Geography; e-mail: alexhydro@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: gidroden@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Scientific Researcher; e-mail: thabigd@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, student; e-mail: anna-artemovna@yandex.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, student; e-mail: m.karash@yandex.ru

components of silting, the bank transformation accounts for the largest share (70%), while the sediment inflow from the watershed and the autochthonous production are on average 15% each.

Key words: silting, effective storage, water supply, abrasion, sediment runoff

Acknowledgements. The authors are grateful to the staff of the Vodokanal State Unitary Enterprise of Sevastopol for their assistance in the organization of surveying work at the Chernorechensk reservoir, and to R.V. Shumaev from the FORT XXI Research and Production Enterprise.

REFERENCES

- Artemenko V.M., Ilin Yu.P., Kucherenko V.S., Ryabinin A.I., Bobrova S.A., Gutsalyuk A.N., Malchenko Yu.A., Saltyikova L.V. *Gidrohimičeskij režim i mikroelementnyj sostav vod Chernorechenskogo vodohranilishcha v 1991–2004 gg.* [Hydrochemical regime and microelement composition of water of the Chernorechensk reservoir in 1991–2004] // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. Vyp. 12. Sevastopol'. T. 12. Sevastopol', 2005. P. 129–149. (In Russian)
- Babich D.B., Vinogradova N.N., Ivanov V.V., Korotaev V.N., Chalova E.R. *Tipizacija i dinamika ust'ev rek, vpadayushchih v vodohranilishcha* [Classification and dynamics of the mouths of rivers, flowing into reservoirs] // *Geomorfologiya*. 2018. № 1. P. 33–44. (In Russian)
- Doganovskij A.M., Orlov V.G. *Sbornik zadach po opredeleniyu osnovnykharakteristik vodnykh ob'ektov sushi (praktikum po gidrologii)*. [Collection of tasks for determining the main characteristics of terrestrial water bodies (hydrology practical course)] SPb.: RGGMU, 2011. 315 p. (In Russian)
- Edelstein K.K. *Vodohranilishcha Rossii*. [Reservoirs in Russia]. M.: GEOS, 1998. 277 p. (In Russian)
- Ivanov V.A., Prusov A.V., Demidov A.N., Minkovskaya R.Ya., Shestopalov V.M. *Vodnyj balans Sevastopol'skogo regiona, vodnye resursy i ih uvelichenie pri stroitel'stve vodohranilishcha v balke Tyomnoj* [Water balance of Sevastopol region, water resources and their increase by reservoir construction in the Temnaya balka] // *Ekologichna bezpeka pribrezhnoï ta shel'fovoj zon ta kompleksne vikoristannya resursiv shel'fu*: Zb. nauk. pr. Sevastopol', 2009. Vol. 17. P. 48–59. (In Russian)
- Klyukin A.A. *Balans nanosov v bassejne r.Voron (Krymskie gory)* [Sediments balance in the Voron River basin (the Crimean mountains)] // *Geomorfologiya*. 1996. № 1. P. 88–96. (In Russian)
- Klyukin A.A. *Balans nanosov v nizkogor'e Kryma* [Sediments balance of Crimean low mountains] // *Geopolitika i ehkogeodinamika regionov*. 2005. Vol. 2. P. 49–58. (In Russian)
- Kompleksnye issledovaniya vodohranilishch. Vyp. 3. *Mozhayskoe vodohranilishche*. [Complex investigations of reservoirs. Mozhaisk reservoir] M.: Izd-vo Mosk un-ta, 1979. 467 p. (In Russian)
- Kremeneckaya E.R., Lomova D.V., Sokolov D.I., Lomov V.A. *Vliyanie stratifikatsii na sedimentatsionnye potoki v dolinnom vodohranilishche* [Influence of stratification on sediment fluxes in a valley-type reservoir] // *Vestnik RFFI*. № 6(78). 2013 g. P. 47–52. (In Russian)
- Krylenko V.I., Krylenko I.V., Krylenko V.V., Dzaganiya E.V. *O vliyanii morfometricheskikh harakteristik mal'nykh gorn'nykh rek na stok nanosov*. [About the influence of small rivers morphometrical characteristics on sediment runoff]. Doneck: OOO Ekotekhnologiya, 2006. 65 p. (In Russian)
- Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverhnostnykh vod sushi. [Multiannual data of regime and resources of land surface waters]. L.: Gidrometeoizdat, 1985. T. II. Vyp. 3. 361 p. (In Russian)
- Resursy poverhnostnykh vod SSSR / Krym. [USSR land surface water resources / Crimea]. L.: Gidrometeoizdat, 1973. T. 6. Vyp. 4. 848 p. (In Russian)
- Spravochnik vodohranilishch SSSR. Chast I. *Vodohranilishcha ob'emom 10 mln m³ i bolee*. [Directory of USSR reservoirs with volume more than 10 mln m³]. M.: Soyuzvodproekt, 1988. 323 p. (In Russian)
- Zakonnov V. V. *Ilonakoplenie v sisteme vodohranilishch volzhskogo kaskada* [Silt storage in the system of reservoirs of the Volga River cascade] // *Trudy IBVV RAN*, vyp. 75(78), 2016. S. 30–40. (In Russian)
- Zakonnov V.V., Zakonnova A.V. *Geograficheskaya zonal'nost' osadkonakopleniya v sisteme vodohranilishch Volgi* [Geographical zonality of sedimentation in the system of reservoirs of the Volga River] // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2008, № 2. P. 105–111. (In Russian)
- Ziminova N.A., Kurdin V.P. *Formirovanie rel'efa i gruntov melkovodij Rybinskogo vodohranilishcha* [Formation of relief and bottom sediments within shallow zones of the Rybinsk reservoir] // *Biologicheskie i gidrologicheskie faktory mestnykh peremeshcheniy ryb v vodohranilishchah*. L., 1968. P. 56–71. (In Russian)
- Web sources:**
Chernorechenskoe vodohranilishche ezhdnevno popolnyaetsya vodoj na 70–80 tysyach kubometrov – pravitel'stvo Sevastopolya [Chernorechensk reservoir daily replenishes by 70–80 thousand cubic meters of water – the government of Sevastopol] URL: <http://www.c-inform.info/news/id/16340/> (data access 05.07.2018) (In Russian)
- Postanovlenie Pravitel'stva Sevastopolya ot 02.03.2017 № 165-PP «Ob utverzhdenii skhemy vodosnabzheniya i vodootvedeniya goroda Sevastopolya na period do 2021 goda s uchetom perspektivy do 2035 goda» [Resolution of the Government of Sevastopol of 02.03.2017 № 165-PP «On approval of the scheme of water supply and sanitation of the city of Sevastopol for the period up to 2021 with the perspective until 2035»] URL: <https://sevastopol.gov.ru/docs/253/32739/> (data access 02.07.2018) (In Russian)

Received 09.08.2018

Revised 12.02.2019

Accepted 12.09.2019