# Спутниковые оценки процессов заиливания Шардаринского водохранилища в период 1999–2021 гг. (река Сырдарья, Казахстан)

**H. H. Абаев** <sup>1,2</sup>, Г. **H. Сагатдинова** <sup>1</sup>, Ю. А. Маглинец <sup>3</sup>, А. Г. Терехов <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт информационных и вычислительных технологий Алматы, 050010, Казахстан E-mail: aterekhov1@yandex.ru

<sup>2</sup> РГП «Казгидромет», Алматы, 050022, Казахстан E-mail: abayev\_n@meteo.kz

<sup>3</sup> Институт космических и информационных технологий СФУ Красноярск, 660074, Россия E-mail: maglinets@mail.ru

Шардаринское вдхр. (Казахстан) с объёмом 5,2 км<sup>3</sup>, построенное в 1967 г. на р. Сырдарье в бассейне Аральского моря, является последним в цепи Нарын-Сырдарьинского каскада ГЭС. Нижняя, равнинная, часть речного бассейна р. Сырдарьи сложена лёссовидными супесями и суглинками. Это приводит к размыванию русла реки и формированию стока взвешенных и донных наносов, которые попадают в ложе Шардаринского вдхр. Водохранилище работает в ирригационном режиме и почти ежегодно срабатывается ниже горизонта мёртвого объёма. При этом осущается значительная часть дна резервуара и появляется возможность спутниковой диагностики долговременных изменений его рельефа, связанных с процессами заиливания. Снимки Landsat-5 TM, Landsat-7, ETM и Landsat-8 OLI двух периодов: 1999-2002 гг. (13 сцен) и 2020-2021 гг. (21 сцена) — использовались для мониторинга распространения водного зеркала водохранилища при различных уровнях воды. На базе этой информации были созданы 3D-модели рельефа дна по состоянию на 1999-2002 и 2020-2021 гг. Водное зеркало распознавалось с помощью нормализованного разностного водного индекса NDWI (англ. Normalized Difference Water Index). Информация по уровням воды бралась из данных гидрологического поста «вдхр. Шардаринское – г. Шардара» РГП «Казгидромет» в день пролёта спутника. Изменения в распространении водного зеркала водохранилища на различных высотах, произошедшие за 20 лет, позволили оценить активность процессов заиливания дна резервуара. В результате проведённых исследований были зарегистрированы разнонаправленные тенденции. Изменения водного режима водохранилища, и в частности строительство в 2011 г. ирригационного машинного канала с водозабором в верхней, юго-восточной, части водохранилища, привело к размыву части речных отложений в этой зоне. В целом степень заиливания периодически осушаемой части дна Шардаринского вдхр. за последние 20 лет оказалась незначительной, всего (+4,4 см), что соответствует скорости накопления речных наносов в  $1,3\pm0,5$  млн м<sup>3</sup> в год. По всей видимости, этому положению способствует техническая возможность и регулярная практика срабатывания водохранилища ниже горизонта мёртвого объёма, а также строительство машинного канала, откачивающего воду и взвеси из верхней части резервуара.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, заиливание водохранилищ, Landsat, урез воды, речные отложения

Одобрена к печати: 24.08.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-210-221

#### Введение

Заиливание водохранилищ — один из ключевых процессов, связанный с функциональностью объекта в долгосрочной перспективе (Annandale, 1987; Borland, Miller, 1960; Fan, Morris, 1992a, b; Mama, Okafor, 2011; Morris, 2020). Эта проблема становится особенно актуальной для рек, переносящих большое количество взвешенного материала. Для крупных рек, протекающих в равнинных ландшафтах, сложенных лёссовыми отложениями, строительство водохранилищ всегда сопряжено с угрозами их быстрого заиливания. В научной литературе это-

му вопросу посвящено достаточно большое количество работ (Cieśla et al., 2020; Dadoria et al., 2017; Kobayashi et al., 2018; Lee, Foster, 2013; Onda et al., 2018; Podger et al., 2021; Tamene et al., 2006; Terêncio et al., 2020).

Большие реки с высоким энергетическим потенциалом обычно имеют каскад гидроэлектростанций. Как правило, крупные русловые водоёмы полностью перехватывают сток
взвешенных наносов, что и формирует процесс его заиливания. Однако, если река протекает
через лёссовидные отложения, сток взвешенных наносов ниже водохранилища быстро восстанавливается за счёт водной эрозии русла. В результате чего идёт процесс заиливания всего
каскада водохранилищ.

Цель данного исследования заключается в анализе процессов заиливания Шардаринского вдхр. на р. Сырдарье (Казахстан) в период между 1999 и 2021 г. Это водохранилище используется для орошения пашни и является последним в цепи Нарын-Сырдарьинского каскада ГЭС (гидроэлектростанции). В данном каскаде находится ряд крупных водохранилищ: Токтогульское (19,5 км³), Чарвакское (2,0 км³), Андижанское (1,9 км³); Кайраккумское (4,2 км³) и Шардаринское (5,2 км³). Информация по заиливанию Шардаринского вдхр. представляет практический интерес для планирования его работы в тёплый период.

Дистанционное зондирование — один из эффективных инструментов оценки состояния водохранилищ, в том числе и для анализа процессов заиливания (Терехов, Пак, 2019; Терехов и др., 2015, 2020; Foteh et al., 2018; Terekhov et al., 2020; Vishwakarma et al., 2015). В настоящем исследовании оценка заиливания дна водохранилища базировалась на спутниковых данных Landsat-5, -7, -8. Метод дистанционного зондирования использует тот факт, что со временем площадь распространения воды в водохранилище при различных уровнях воды уменьшается из-за накопления речных наносов. Спутник предоставляет информацию о площади распространения воды в водохранилище в разные годы, что позволяет оценивать интенсивность осадконакопления. Данный подход представляет собой наиболее простой способ оценки заиливания водохранилищ (Dadoria et al., 2017; Foteh et al., 2018; Goel, Jain, 1996; Santhoshi, Kunar, 2021).

### Территория обследования

Река Сырдарья имеет длину более 2200 км, площадь бассейна 290 тыс. км<sup>2</sup> и является второй по водности рекой Центральной Азии с годовыми водными ресурсами около 30 км<sup>3</sup>. Сырдарья относится к бассейну Аральского моря и пересекает ряд стран (Киргизия, Таджикистан, Узбекистан, Казахстан) (рис. 1, см. с. 212). В настоящий момент из-за катастрофической деградации Аральского моря сток реки поддерживает только его северную часть — Малый Арал (Sorg et al., 2014; Yang et al., 2020).

Подавляющая часть стока р. Сырдарьи формируется в хребтах Тянь-Шаня, питание в основном снеговое. После выхода из горной зоны река течёт по обширной равнине, сложенной лёссовидными супесями и суглинками, что приводит к насыщению вод взвесями, особенно в период весенне-летнего половодья. Значительное количество переносимых речной водой взвесей является одной из характерных особенностей всех крупных рек бассейна Аральского моря (Мухамеджанов и др., 2022; Arifjanov et al., 2018).

В 1967 г. в Казахстане на р. Сырдарье, на границе с Узбекистаном, было построено и запущено в эксплуатацию русловое Шардаринское вдхр. (см.  $puc.\ I$ ). При нормальном подпорном уровне (НПУ) в 252 м в Балтийской системе высот (БСВ) водохранилище имело площадь 848 км², объём — 5,166 км³, из которых 4,383 км³ относилось к рабочему объёму, а 0,783 км³ — к мёртвому (горизонт мёртвого объёма на уровне 244 м БСВ). Наибольшая глубина составляла 22 м, средняя — 6,3 м, расчётный срок службы — 100 лет, из которых на текущий момент 55 лет уже прошло. По причине хронического дефицита воды для ирригации пашни практически каждый год водохранилище срабатывается ниже отметки горизонта мёртвого объёма (ГМО) ( $puc.\ 2$ , см. с. 212). В настоящий момент водохранилище работает в ирригационном режиме. Заполнение резервуара происходит в холодный период (декабрь—апрель),

а срабатывание — в тёплый (май – август) (см. *puc. 2*). Максимум запаса воды относится к апрелю – маю, а минимум — к августу – сентябрю. Водохранилище обеспечивает ирригацию свыше 200 тыс. га пашни юга Казахстана в бассейне р. Сырдарьи.



*Puc. 1.* Картосхема бассейна р. Сырдарьи с отметками расположения Шардаринского (Казахстан) и Кайраккумского (Таджикистан) водохранилищ



 $Puc.\ 2.$  Среднесуточная динамика уровня воды в Шардаринском вдхр. в период 2010—2021 гг. по данным гидропоста «вдхр. Шардаринское — г. Шардара» Республиканского государственного предприятия (РГП) «Казгидромет» с отметками нормального подпорного уровня и горизонта мёртвого объёма

#### Исходные данные

Оценка степени заиливания Шардаринского вдхр. основывалась на данных из двух источников. Первый — это среднесуточный уровень воды, зарегистрированный на гидропосту «вдхр. Шардаринское – г. Шардара» (ID-16910) РГП «Казгидромет», с отметкой нуля на

232,00 м БСВ. Второй — это спутниковые снимки Landsat-5, -7, -8 (разрешение 30 м) периода 1999—2021 гг., которые использовались для мониторинга распространения водного зеркала и определения позиций его границ. В работе было использовано 34 снимка: 13 — в период 1999—2002 гг. и 21 — в период 2020—2021 гг. (*таблица*). Источник спутниковой информации — дата-портал Glovis (https://glovis.usgs.gov).

Спутниковые данные, использованные для мониторинга водного зеркала Шардаринского вдхр. (Казахстан), и среднесуточный уровень воды, зарегистрированный на гидропосту «вдхр. Шардаринское – г. Шардара» РГП «Казгидромет» в день пролёта спутника

	Дата (дд.мм.гггг) 2020—2021 гг.	Тип спутника	Уровень воды в водохранилище (см БСВ)	№	Дата (дд.мм.гггг) 1999—2002 гг.	Тип спутника	Уровень воды в водохранилище (см БСВ)
1	04.09.2020	Landsat-8	24331	1	2.08.1999	Landsat-5	24738
2	20.09.2020		24326	2	2.06.2000		24975
3	22.10.2020		24388	3	9.06.2000		24931
4	07.11.2020		24417	4	20.07.2000		24613
5	23.11.2020		24515	5	31.08.2001		24196
6	09.12.2020		24687	6	16.09.2001		24290
7	25.12.2020		24834	7	29.04.2002	Landsat-7	25226
8	10.01.2021		24945	8	24.06.2002	Landsat-5	25226
9	11.02.2021		25032	9	18.07.2002	Landsat-7	25089
_10	27.02.2021		25052	10	26.07.2002	Landsat-5	25032
_11	31.03.2021		25183	11	10.08.2002	Landsat-7	24854
_12	16.04.2021		25184	12	20.09.2002		24451
_13	02.05.2021		25143	13	27.09.2002	Landsat-5	24389
14	18.05.2021		25092				
15	03.06.2021		25036				
16	19.06.2021		24965				
17	05.07.2021		24862				
_18	21.07.2021		24665				
19	06.08.2021		24398				
20	22.08.2021		24181				
21	07.09.2021		24201				

# Методика обработки данных

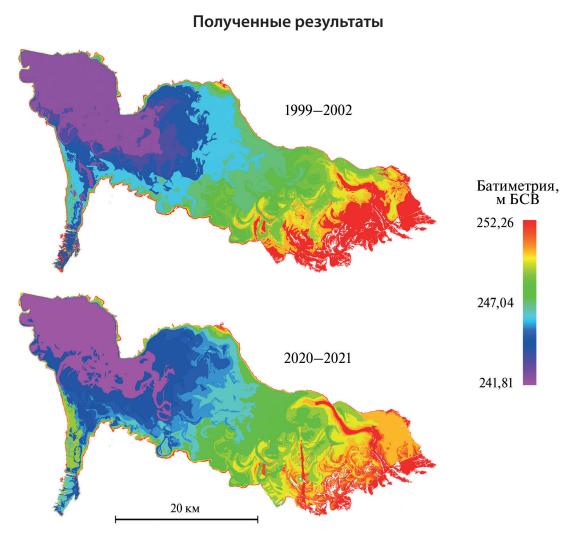
В качестве методики оценки степени заиливания дна водохранилища использовался известный подход (Dadoria et al., 2017; Foteh et al., 2018; Goel, Jain, 1996; Santhoshi, Kunar, 2021), основанный на спутниковой регистрации позиций водного зеркала при различных уровнях воды. Предполагается, что односвязное водное зеркало водохранилища с высокой точностью отображает определённый уровень по высоте и, соответственно, позиция уреза воды при этом может отождествляться с изогипсой. Распространение водного зеркала водохранилища уменьшается со временем из-за заиливания. Спутниковый анализ этих изменений позволяет количественно оценивать скорость заиливания.

В процессе сезонной работы Шардаринского вдхр. уровень воды существенно меняется. Например, в сезоне 2021 г. он варьировался от 241,77 м (16.09.2021) до 252,00 м (12.04.2021) (БСВ), т.е. размах составил 10,23 м. Для периода 1999—2002 гг. — соответственно от 241,96 м (31.08.2001) до 252,26 м (29.04.2002) (БСВ), размах — 10,30 м. Снижение уровня воды в пределах 10 м приводит к осушению около 80 % дна водохранилища.

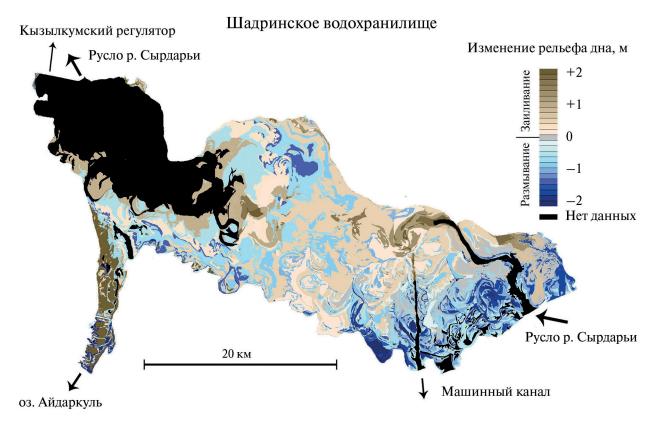
Оценка изменений рельефа периодически осущаемой части дна Шардаринского вдхр., вызываемых его заиливанием, базировалась на спутниковых данных Landsat-5, -7, -8. Пиксели, относящиеся к классу воды, были получены с помощью порогового алгоритма при анализе нормализованного разностного индекса воды (англ. Normalized Difference Water Index — NDWI). Индекс рассчитывался согласно формуле: NDWI = (Green — NIR)/(Green + NIR) (Green — зелёный; NIR — англ. near infrared, ближний инфракрасный) или (BAND2[525—600 нм] — BAND5[845—885 нм]) / (BAND2[525—600 нм] + BAND5[845—885 нм]) по данным Landsat-8 OLI (англ. Operational Land Imager) (МсFeeters, 1996). Более ранние спутники этой серии, Landsat-5 и Landsat-7, также имеют каналы с почти аналогичными спектральными характеристиками, что позволяет обеспечивать близкие подходы при классификации и выделении водного зеркала для периодов 1999—2002 и 2020—2021 гг.

Альтиметрическая привязка водного зеркала осуществлялась к среднесуточной высоте уровня воды (гидропост «вдхр. Шардаринское – г. Шардара») в водохранилище в день пролёта спутника. Финальные маски воды проверялись экспертным дешифрированием, чтобы гарантировать учёт локальных искажений от возможных дымок и небольших облаков.

Разница между моделями 3D-рельефов периодически осущаемой части дна Шардаринского вдхр., построенными для периодов 1999—2002 и 2020—2021 гг., отображала суммарный результат изменений рельефа дна в результате процессов заиливания/размывания за последние 20 лет.



*Рис. 3.* 3D-модели рельефа дна Шардаринского вдхр., восстановленные по конфигурациям береговых линий при различной степени наполненности резервуара. Построены на основе спутниковой съёмки Landsat-5, -7, -8 за 1999—2002 и 2020—2021 гг.



*Рис. 4.* Разница между 3D-моделями рельефа дна Шардаринского вдхр., построенными на основе спутниковой съёмки Landsat-5, -7, -8 периодов 1999—2002 и 2020—2021 гг.

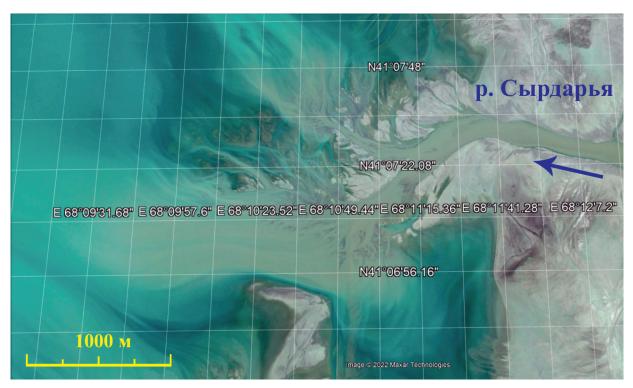
На *рис. 3* (см. с. 214) представлены 3D-модели рельефа периодически осущаемой части дна Шардаринского вдхр. для 1999—2002 и 2020—2021 гг., полученные по данным распространения водного зеркала на различных высотах. На *рис. 4* показаны изменения в 3D-модели рельефа дна рассматриваемого резервуара, произошедшие за период с 1999—2002 по 2020—2021 гг. В среднем зарегистрированное изменение рельефа периодически осущаемой части дна Шардаринского вдхр. составило +4,4 см.

# Обсуждение

Периодически осущаемая часть дна водохранилища в своём максимуме имеет относительно большой размер: более 30 км в длину и площадь свыше 600 км<sup>2</sup>. В зависимости от уровня воды в резервуаре урез воды может находиться практически в любом месте данной территории. Взвешенный материал, переносимый и влекомый речной водой, оседает в основном в районе впадения реки в водохранилище (рис. 5, см. с. 216). Таким образом, пространственное распределение отлагаемых речных наносов на территории периодически осущаемой части дна зависит от параметров сезонного графика изменения уровня водохранилища. Чем дольше сохраняется определённый уровень воды в резервуаре, тем большее количество речных наносов отлагается в береговой зоне этого уровня. При этом наиболее значимы многоводные режимы, когда река переносит и отлагает большое количество взвешенного материала.

Для понимания принципов перераспределения речных наносов на территории периодически осущаемого дна Шардаринское вдхр. необходимо также учитывать потенциальные стоки речных наносов из резервуара. Согласно данным РГП «Казгипроводхоз», из Шардаринского вдхр. имеется ряд водосбросов. Существуют следующие водосбросы: в здании ГЭС с максимальным расходом в 1800 м³/с; донный; водосброс Кызылкумского регулятора с расходом до 200 м³/с, который наполняет ирригационную систему для полива сельскохозяйственных

полей ниже водохранилища; водосброс Арнасайского гидроузла для аварийного сброса воды с максимумом при строительстве в  $2160 \,\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$  ( $860 \,\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$  после реконструкции  $2004 \,\mathrm{r.}$ ). Два последних водосброса используются ежегодно, и проходящая через них вода может нести взвешенный материал. При низкой воде водосбросный коридор в оз. Айдаркуль осущается, что позволило также оценить изменения в степени его заиливания (см. *puc.* 4). В рассмотренный период регистрировалось значительное заиливание данной зоны водохранилища (см. *puc.* 4).



*Puc.* 5. Место впадения р. Сырдарьи в Шардаринское вдхр. Состояние на 2 ноября 2013 г. Снимок взят из сервиса Google Планета Земля (*англ*. Google Earth)

В 2011 г. был построен машинный канал с расходом воды до 70 м<sup>3</sup>/с, который с помощью насосных станций поднимает воду из Шардаринского вдхр. для её дополнительной подачи в канал «Достык». Канал «Достык» представляет собой основной ирригационный канал для поливной пашни Мактааральского и Жетысайского районов Туркестанской обл. Казахстана с расходом воды до 230 м<sup>3</sup>/с. Появление дополнительного водозабора, расположенного в середине юго-восточной части водохранилища, изменило водный режим этой части резервуара и, по всей видимости, способствовало формированию юго-восточной зоны размыва речных отложений на дне Шардаринского вдхр. (см. рис. 4).

#### Оценка точности полученных результатов

Цель исследования состоит в оценке тенденций и пространственных особенностей в процессе заиливания Шардаринского вдхр. в течение последних 20 лет. Требования к точности такого рассмотрения несколько ниже, чем при количественном описании заиливания водохранилища. Наземная валидация полученных результатов по оценкам изменений 3D-рельефа дна Шардаринского вдхр. за последние 20 лет ввиду морфологической сложности и малой доступности территории крайне затруднительна. Методика восстановления 3D-рельефа местности на основе данных по распространению водного зеркала на различных высотах хорошо известна и максимально эффективна для однородных форм рельефа. Неоднородности в виде локальных отрицательных форм микрорельефа (ямы, небольшие котловины) при такой ме-

тодике отображаются плохо. При наступающем водном зеркале после превышения уровнем воды бортов локальной отрицательной формы рельефа она одномоментно заполняется водой. В случае отступающего водного зеркала формируются отдельные водоёмы со своим водным режимом. Инфильтрация и испарение становятся доминирующими процессами, регулирующими наполненность таких объектов, при этом теряется прямая связь с уровнем воды основного зеркала.

Потенциальные ошибки в рамках использованной методики обработки данных могут быть связаны с двумя причинами. Во-первых, с неточностями при оценках уровня воды. В схеме расчётов предполагалось, что водное зеркало является совершенно плоским, поэтому его граница представляет собой изогипсу. Кроме того, среднесуточный уровень воды принимался как уровень, существовавший при пролёте спутника. Однако это не совсем так. Ветровое поле вполне может немного искажать водное зеркало и формировать небольшие сгонно-нагонные явления, а уровень воды в течение дня часто не является стабильным изза режима заполнения/срабатывания водохранилища. Масштаб ошибок, связанных с вышеперечисленными причинами, можно оценить через величину среднеквадратичного отклонения уровней воды, замеренных на гидропосте «вдхр. Шардаринское – г. Шардара» РГП «Казгидромет» в 08:00 и 20:00 относительно среднесуточного значения. Так, для периода 1 марта — 30 сентября 2020 г. (214 измерений) среднеквадратичное отклонение составило 1,5 см, что можно принять за оценку масштаба потенциального искажения результатов вследствие ошибок измерений уровня воды.

Второй источник ошибок — это неточности в определении позиции односвязного водного зеркала. Можно условно выделить два класса границ водного зеркала, регистрируемых спутником: это границы либо наступающего, либо отступающего водного зеркала. Наступающее водное зеркало имеет более чёткую границу. Однако наполнение водохранилища происходит в холодный период (ноябрь — март) на фоне развитого облачного покрова, что не позволяет формировать достаточно детальную базу данных по позициям границ водного зеркала. Отступающее водное зеркало в период апреля — сентября даёт лучшие возможности для формирования детальной базы высококачественных спутниковых снимков из-за типичной малооблачной погоды лета — осени в Центральной Азии. Однако отступающее водное зеркало продуцирует в примыкающей к береговой линии зоне отдельные, оторванные от водохранилища локальные водоёмы, уровень воды в которых не связан с уровнем в водохранилище. Такие водные объекты распознавались с помощью экспертного дешифрирования и исключались из рассмотрения.

В задаче, решаемой в настоящем исследовании и связанной с оценкой изменений, произошедших за последние 20 лет, более значимую роль играют однородность экспертного дешифрирования (одинаковость подходов) и однотипность границ водного зеркала (класс наступающего зеркала либо отступающего). Период 1999—2002 гг. представлен 13 вариантами береговых линий, каждый из которых относился к отступающему водному зеркалу. Для 2020—2021 гг. использовался 21 вариант береговых линий, из которых только 9 можно отнести к классу наступающего зеркала. То есть в целом в анализе в обоих периодах доминировали конфигурации границ отступающего водного зеркала. Предполагалось, что это обстоятельство обеспечит получение корректных оценок тенденций изменений рельефа дна водохранилища.

#### Заключение

Проведённые исследования показали, что в период между 1999—2002 и 2020—2021 гг. в разных частях периодически осущаемого дна Шардаринского вдхр. происходили разнонаправленные процессы заиливания/размывания. Основные направления эволюции рельефа дна резервуара, очевидно, были связаны с изменениями водного режима, произошедшими между периодами обследования. Регистрировалось размывание речных наносов, по большей части локализованное в юго-восточной части водохранилища, что, очевидно, связано со строительством и эксплуатацией в течение 10 лет машинного канала и его водозабора, расположенного

в середине восточной части ложа водохранилища. Уменьшение пропускной способности водосброса Арнасайского гидроузла после 2004 г., по всей видимости, послужило причиной заиливания примыкающей к нему части дна водохранилища. В целом для периодически осушаемого дна водохранилища режим изменений его рельефа может быть охарактеризован как незначительное заиливание (см. *puc. 4*).

Суммарно за последние 20 лет скорость заиливания периодически осушаемой части Шардаринского вдхр. оценивалась в  $1,3\pm0,5$  млн м $^3$ /год. Это обеспечило среднее заиливание осушаемой части дна в размере +4,4 см. Столь незначительный уровень заиливания, по всей видимости, обусловлен двумя факторами. Во-первых, изменением водного режима и появлением дополнительного стока взвешенных речных наносов через построенный машинный ирригационный канал в юго-восточной части водохранилища. Во-вторых, частым срабатыванием водохранилища ниже горизонта мёртвого объёма. При очень низких уровнях воды в водохранилище р. Сырдарья, проходя через временно осушенную часть дна водохранилища, осуществляет перенос речных наносов в область постоянно существующего водного зеркала. Эти речные отложения не могут быть учтены в рамках использованной методики.

Работа выполнена при поддержке программно-целевого финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проекты № BR18574144 и BR10965172.

# Литература

- 1. *Мухамеджанов И.Д.*, *Константинова А.М.*, *Лупян Е.А.*, *Умирзаков Г.У.* Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 87—103. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.
- 2. *Терехов А. Г.*, *Пак А. А.* Спутниковый прогноз влияния пополнения Капшагайского водохранилища (КНР) на водность трансграничной р. Иле в 2019 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 298—302. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-298-302.
- 3. *Терехов А. Г.*, *Пак И. Т.*, *Долгих С. А*. Данные Landsat-5, -7, -8 и ЦМР в задаче мониторинга гидрологического режима Капчагайского водохранилища на реке Текес (китайская часть бассейна реки Иле) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 174—182.
- 4. *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.
- 5. Annandale G. W. Reservoir sedimentation. N. Y.: Elsevier Science Publ., 1987. 220 p.
- 6. *Arifjanov A. M.*, *Apakhujaeva T. A.*, *Húska D.* Sediment movement mode in rivers of Uzbekistan environmental aspects // Acta Horticulturae et Regiotecturae. 2018. V. 21. No. 1. P. 10–12. DOI: 10.2478/ahr-2018-0003.
- 7. *Borland W. M.*, *Miller C. R.* Distribution of sediment in large reservoirs // Trans. American Society of Civil Engineers. 1960. V. 125. No. 1. P. 166–180.
- 8. *Cieśla M.*, *Gruca-Rokosz R.*, *Bartoszek L.* The Connection between a Suspended Sediments and Reservoir Siltation: Empirical Analysis in the Maziarnia Reservoir, Poland // Resources. 2020. V. 9. Iss. 3. Art. No. 30. DOI: 10.3390/resources9030030.
- 9. *Dadoria D.*, *Tiwari H. L.*, *Jaiswal R. K.* Assessment of reservoir sedimentation in Chhattisgarh State using remote sensing and GIS // Intern. J. Civil Engineering and Technology. 2017. V. 8. Iss. 4. P. 526–534.
- 10. *Fan J.*, *Morris G. L.* (1992a) Reservoir sedimentation I: Delta and density current deposits // J. Hydraulic Engineering. 1992. V. 118. P. 354–369.
- 11. *Fan J.*, *Morris G. L.* (1992b) Reservoir sedimentation II: Reservoir Desiltation and long-term storage capacity // J. Hydraulic Engineering. 1992. V. 118. P. 370–384.
- 12. Foteh R., Garg V., Nikam B. R., Khadatare M. Y., Aggarwal S. P., Kumar A. S. Reservoir Sedimentation Assessment Through Remote Sensing and Hydrological Modelling // J. Indian Society of Remote Sensing. 2018. V. 46. P. 1893–1905. DOI: 10.1007/s12524-018-0843-6.
- 13. *Goel M.*, *Jain S. K.* Evaluation of reservoir sedimentation using multi-temporal IRS-1A LISS II data // J. Asian-Pacific Remote Sensing and GIS. 1996. V. 8. No. 2. P. 39–43.

- 14. *Kobayashi S.*, *Koshiba T.*, *Sumi T.* Current and future study topics on reservoir sediment management by bypass tunnels // J. Disaster Research. 2018. V. 13. No. 4. P. 668–676. DOI: 10.20965/jdr.2018.p0668.
- 15. *Lee C.*, *Foster G.* Assessing the potential of reservoir outflow management to reduce sedimentation using continuous turbidity monitoring and reservoir modelling: Continuous turbidity to assess reservoir sedimentation // Hydrological Process. 2013. V. 27. Iss. 10. P. 1426–1439. DOI: 10.1002/hyp.9284.
- 16. Mama C., Okafor F. Siltation in reservoirs // Nigerian J. Technology. 2011. V. 30. No. 1. P. 85–90.
- 17. *McFeeters S. K.* The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. Iss. 7. P. 1425–1432. DOI: 10.1080/0143116908948714.
- 18. *Morris G. L.* Classification of Management Alternatives to Combat Reservoir Sedimentation // Water. 2020. V. 12. Iss. 3. Art. No. 861. DOI: 10.3390/w12030861.
- 19. *Onda C.*, *Sumi T.*, *Asahi T.* Planning and analysis of sedimentation countermeasures in hydropower dams considering properties of reservoir sedimentation // J. Disaster Research. 2018. V. 13. No. 4. P. 702–708. DOI: 10.20965/jdr.2018.p0702.
- 20. Podger G. M., Mobin-ud-Din A., Yingying Yu., Joel P.S., Syed M. M.A.S., Zarif I. Kh. Development of the Indus River System Model to Evaluate Reservoir Sedimentation Impacts on Water Security in Pakistan // Water. 2021. V. 13. Iss. 7. Art. No. 895. DOI: 10.3390/w13070895.
- 21. *Santhoshi P., Kunar S.* Assessment of Sedimentation in Maithon Reservoir using Remote Sensing and GIS // Indian J. Ecology. 2021. V. 48. Iss. 4. P. 1001–1004.
- 22. Sorg A., Mosello B., Shalpykova G., Allan A., Clarvis M. H., Stoffel M. Coping with changing water resources: The case of the Syr Darya river basin in Central Asia // Environmental Science and Policy. 2014. V. 43. P. 68–77. DOI: 10.1016/j.envsci.2013.11.003.
- 23. *Tamene L.*, *Park S. J.*, *Dikau R.*, *Vlek P. L. G.* Reservoir siltation in the semi-arid highlands of northern Ethiopia: sediment yield-catchment area relationship and a semi-quantitative approach for predicting sediment yield. Earth Surface Processes and Landforms // J. British Geomorphological Research Group. 2006. V. 31. Iss. 11. P. 1364–1383. DOI: 10.1002/esp.1338.
- 24. *Terekhov A.*, *Makarenko N.*, *Pak A.*, *Abayev N.* Using the Digital Elevation Model (DEM) and coastlines for satellite monitoring of small reservoir filling // Cogent Engineering. 2020. V. 7. Iss. 1. DOI: 10.1080/23311916.2020.1853305.
- 25. *Terêncio D. P. S.*, *Cortes R. M. V.*, *Pacheco F. A. L.*, *Moura J. P.*, *Fernandes L. F. S.* A Method for Estimating the Risk of Dam Reservoir Silting in Fire-Prone Watersheds: A Study in Douro River, Portugal // Water. 2020. V. 12. Iss. 11. Art. No. 2959. DOI: 10.3390/w12112959.
- 26. Vishwakarma Y., Tiwari H. L., Jaiswal R. K. Assessment of Reservoir Sedimentation Using Remote Sensing Technique with GIS Model-A Review // Intern. J. Engineering and Management Research. 2015. V. 5. Iss. 3. P. 411–417.
- 27. Yang X., Wang N., Chen A., He J., Hua T., Qie Y. Changes in area and water volume of the Aral Sea in the arid Central Asia over the period of 1960–2018 and their causes // Catena. 2020. V. 191. Art. No. 104566. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104566.

# Assessment of Shardara Reservoir siltation during 1999–2021 using satellite data (Syrdarya River, Kazakhstan)

N. N. Abayev 1,2, G. N. Sagatdinova 1, Yu. A. Maglinets 3, A. G. Terekhov 1

<sup>1</sup> Institute of Information and Computational Technologies, Almaty 050010, Kazakhstan E-mail: aterekhov1@yandex.ru

<sup>2</sup> RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan E-mail: abayev n@meteo.kz

<sup>3</sup> SibFU Institute of Space and Information Technologies, Krasnoyarsk 660074, Russia E-mail: maglinets@mail.ru

The Shardara Reservoir (Kazakhstan) with a volume of 5.2 km<sup>3</sup>, built in 1967 on the Syrdarya River in the Aral Sea basin, is the last in the chain of the Naryn-Syrdarya cascade of hydroelectric power plants. The lower, flat part of the river basin is composed of loess-like sandy loams and loams. This leads, due to the erosion of the riverbed, to the formation of a significant runoff of suspended and

bottom sediments in the Syrdarya River, which enter into the Shardara Reservoir bed. The Reservoir operates in irrigation mode and is triggered almost annually below the dead volume horizon. In this case, a significant part of the Reservoir bottom is drained and satellite diagnostics of long-term changes in its relief becomes possible, which is associated with the activity of silting processes. Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI data of two periods: 1999-2002 (13 scenes) and 2020-2021 (21 scenes) were used to monitor the distribution of the Reservoir water mirror at different water levels The Normalized Water Difference Index (NDWI) was used to recognize the Reservoir water mirror. The shorelines altitude was equated to the average daily water level altitude in the Reservoir, registered at the RSE Kazhydromet hydro station, ID-16910 (Res. Shardara – Shardara city) on the day of the satellite overpass. Changes in the distribution of the Reservoir water mirror at various water levels that occurred over 20 years allowed us to assess the activity of the processes of silting of the Reservoir bottom. As a result of the conducted research, multidirectional silting trends were registered. Changes in the Reservoir water regime, and in particular, the construction in 2011 of an additional irrigation canal with water intake in the southeastern part of the Reservoir, led to the erosion of a part of river sediments in this zone. In general, the silting degree of the periodically drained bottom of the Shardara Reservoir over the past 20 years has turned out to be insignificant, only (+4.4 cm), which corresponds to the rate of accumulation of river sediments of 1.3±0.5 million m<sup>3</sup> per year. Apparently, this is facilitated by the technical possibility and regular practice of triggering the Reservoir below the horizon of the dead volume, as well as the construction of a machine channel pumping water and suspensions from the upper part of the Reservoir.

Keywords: remote sensing, reservoir silting, Landsat, shoreline position, river sediments

Accepted: 24.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-210-221

#### References

- 1. Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Umirzakov G. U., Evaluation of satellite monitoring capabilities of stream runoff based on the Amu Darya River state analysis, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 87–103 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.
- 2. Terekhov A. G., Pak A. A., Influence of the Kapshagay Reservoir (China) refill on transboundary River Ile runoff and satellite-based forecasting, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmo-sa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 298–302 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-298-302.
- 3. Terekhov A. G., Pak I. T., Dolgikh S. A., Hydrology monitoring of Kapchagay Reservoir on River Tekes (China's part of River Ile basin) based on Landsat-5, -7, -8 data and DEM batymetry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 174—182 (in Russian).
- 4. Terekhov A. G., Abayev 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.
- 5. Annandale G. W., Reservoir sedimentation, New York: Elsevier Science Publ., 1987, 220 p.
- 6. Arifjanov A. M., Apakhujaeva T. A., Húska D., Sediment movement mode in rivers of Uzbekistan environmental aspects, *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 2018, Vol. 21, No. 1, pp. 10–12, DOI: 10.2478/ahr-2018-0003.
- 7. Borland W. M., Miller C. R., Distribution of sediment in large reservoirs, *Trans. American Society of Civil Engineers*, 1960, Vol. 125, No. 1, pp. 166–180.
- 8. Cieśla M., Gruca-Rokosz R., Bartoszek L., The Connection between a Suspended Sediments and Reservoir Siltation: Empirical Analysis in the Maziarnia Reservoir, Poland, *Resources*, 2020, Vol. 9, Issue 3, Art. No. 30, DOI: 10.3390/resources9030030.
- 9. Dadoria D., Tiwari H. L., Jaiswal R. K., Assessment of reservoir sedimentation in Chhattisgarh State using remote sensing and GIS, *Intern. J. Civil Engineering and Technology*, 2017, Vol. 8, Issue 4, pp. 526–534.
- 10. Fan J., Morris G. L. (1992a), Reservoir sedimentation I: Delta and density current deposits, *J. Hydraulic Engineering*, 1992, Vol. 118, pp. 354–369.
- 11. Fan J., Morris G. L. (1992b), Reservoir sedimentation II: Reservoir Desiltation and long-term storage capacity, *J. Hydraulic Engineering*, 1992, Vol. 118, pp. 370–384.
- 12. Foteh R., Garg V., Nikam B. R., Khadatare M. Y., Aggarwal S. P., Kumar A. S., Reservoir Sedimentation Assessment Through Remote Sensing and Hydrological Modelling, *J. Indian Society of Remote Sensing*, 2018, Vol. 46, pp. 1893–1905, DOI: 10.1007/s12524-018-0843-6.

- 13. Goel M., Jain S. K., Evaluation of reservoir sedimentation using multi-temporal IRS-1A LISS II data, *J. Asian-Pacific Remote Sensing and GIS*, 1996, Vol. 8, No. 2, pp. 39–43.
- 14. Kobayashi S., Koshiba T., Sumi T., Current and future study topics on reservoir sediment management by bypass tunnels, *J. Disaster Research*, 2018, Vol. 13, No. 4, pp. 668–676, DOI: 10.20965/jdr.2018.p0668.
- 15. Lee C., Foster G., Assessing the potential of reservoir outflow management to reduce sedimentation using continuous turbidity monitoring and reservoir modelling: Continuous turbidity to assess reservoir sedimentation, *Hydrologycal Process*, 2013, Vol. 27, Issue 10, pp. 1426–1439, DOI: 10.1002/hyp.9284.
- 16. Mama C, Okafor F., Siltation in reservoirs, Nigerian J. Technology, 2011, Vol. 30, No. 1, pp. 85–90.
- 17. McFeeters S. K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, Issue 7, pp. 1425–1432, DOI: 10.1080/0143116908948714.
- 18. Morris G. L., Classification of Management Alternatives to Combat Reservoir Sedimentation, *Water*, 2020, Vol. 12, Issue 3, Art. No. 861, DOI: 10.3390/w12030861.
- 19. Onda C., Sumi T., Asahi T., Planning and analysis of sedimentation countermeasures in hydropower dams considering properties of reservoir sedimentation, *J. Disaster Research*, 2018, Vol. 13, No. 4, pp. 702–708, DOI: 10.20965/jdr.2018.p0702.
- 20. Podger G. M., Mobin-ud-Din A., Yingying Yu., Joel P. S., Syed M. M. A. S., Zarif I. Kh., Development of the Indus River System Model to Evaluate Reservoir Sedimentation Impacts on Water Security in Pakistan, *Water*, 2021, Vol. 13, Issue 7, Art. No. 895, DOI: 10.3390/w13070895.
- 21. Santhoshi P., Kunar S., Assessment of Sedimentation in Maithon Reservoir using Remote Sensing and GIS, *Indian J. Ecology*, 2021, Vol. 48, Issue 4, pp. 1001–1004.
- 22. Sorg A., Mosello B., Shalpykova G., Allan A., Clarvis M. H., Stoffel M., Coping with changing water resources: The case of the Syr Darya river basin in Central Asia, *Environmental Science and Policy*, 2014, Vol. 43, pp. 68–77, DOI: 10.1016/j.envsci.2013.11.003.
- 23. Tamene L., Park S.J., Dikau R., Vlek P.L.G., Reservoir siltation in the semi-arid highlands of northern Ethiopia: sediment yield-catchment area relationship and a semi-quantitative approach for predicting sediment yield. Earth Surface Processes and Landforms, *J. British Geomorphological Research Group*, 2006, Vol. 31, Issue 11, pp. 1364–1383, DOI: 10.1002/esp.1338.
- 24. Terekhov A., Makarenko N., Pak A., Abayev N., Using the Digital Elevation Model (DEM) and coast-lines for satellite monitoring of small reservoir filling, *Cogent Engineering*, 2020, Vol. 7, Issue 1, DOI: 10.1080/23311916.2020.1853305.
- 25. Terêncio D. P. S., Cortes R. M. V., Pacheco F. A. L., Moura J. P., Fernandes L. F. S., A Method for Estimating the Risk of Dam Reservoir Silting in Fire-Prone Watersheds: A Study in Douro River, Portugal, *Water*, 2020, Vol. 12, Issue 11, Art. No. 2959, DOI: 10.3390/w12112959.
- 26. Vishwakarma Y., Tiwari H.L., Jaiswal R.K., Assessment of Reservoir Sedimentation Using Remote Sensing Technique with GIS Model- A Review, *Intern. J. Engineering and Management Research*, 2015, Vol. 5, Issue 3, pp. 411–417.
- 27. Yang X., Wang N., Chen A., He J., Hua T., Qie Y., Changes in area and water volume of the Aral Sea in the arid Central Asia over the period of 1960–2018 and their causes, *Catena*, 2020, Vol. 191, Art. No. 104566, DOI: 10.1016/j.catena.2020.104566.