

Литература

1. Козлов В.И., Никифоров-Никишин А.Л., Бородин А.Л.
2. Аквакультура. - М.: МГУТУ, 2004. - 433 с.
3. Техническое руководство ФАО по ответственному рыбному хозяйству, развитие аквакультуры, экосистемный подход к аквакультуре, продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций, Рим: 2013.- 71 с.
4. Амиркулов Х. 2002. Динамика численности промысловых видов рыб Нурекского водохранилища. В сборнике материалы второй Междунар. конф. «Экологические особенности биологического разнообразия». Душанбе: - С. 25-26
5. Хайтов А. Х. 2006. – Мохипарвари дар амал. Душанбе: - 101с.

УДК: 627.81+627.8.034.7+504.064.37

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗАИЛЕНИЯ РУСЛОВЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Аминов Дж.Х.^{1,2}, Фазылов А.Р.¹, Кобулиев З.В.¹, Аминов Джовид³, и Сафаров М.С.⁴

1 Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, 734042, Душанбе, Таджикистан, alifazilov53@gmail.com

2 Синьцзянский институт экологии и географии Китайской академии наук, 830011, Урумчи, Китай, javhar1985@gmail.com

3 Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, 734063 Душанбе, Таджикистан, jovid.aminov@outlook.com

4 Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), 734063, Душанбе, Таджикистан, mustafo-2010@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассмотрены методы оценки состояния заиления водохранилищ. Одним из проблем, препятствующих нормальному функционированию водохранилищ является процесс заиления не только озёрной части емкости водохранилища, но также и речной части наносами. Осуществление постоянного мониторинга состояния заиления водохранилищ способствует обеспечению не только нормального функционирования всего комплекса сооружений, но также в результате мониторинга создаются условия их безопасной эксплуатации. Используя данные нормализованного разностного водного индекса (NDWI) с 1978 по 2019 год, подтверждена эффективность применения данного метода для мониторинга заиления в водохранилище Нурекской ГЭС. Исследования по визуализации и мониторинга заиления наносами чаши водохранилища Нурекской ГЭС, выполнялись с использованием наборов данных Landsat с качеством уровня 1Т (исправленная местность), полученные из сервиса EarthExplorer Геологической службы США (USGS).

Ключевые слова: водохранилище, заиление, осадки, дистанционное зондирование.

Аннотатсия: Дар мақолаи мазкур усулҳои баҳодихии ҳолати таҳшинишавии обовардҳо дар обанборҳо баррасӣ шудаанд. Яке аз масъалаҳои ба фаъолияти мӯтадили обанборҳо монеаишаванда ин раванди таҳшинишавии на танҳо қисмати кӯли зарфияти обанбор, ҳамчунин қисмати дарёӣ бо обовардҳо мебошад. Таъбиқи мониторинги доими ҳолати таҳшинишавии обанбор барои таъмини на танҳо фаъолияти мӯтадили тамоми

маҷмааи ишиоот мусоидат менамояд, балки инчунин ҳолати истифодабарии бехатарии онҳо таъмин мегардад. Бо истифода аз маълумоти мўтадилишудаи индекси фарққунандаи об (NDWI) аз соли 1978 то соли 2019, самаранокӣ истифодаи усули мазкур барои мониторинги таҳшинишавӣ дар обанбори Нерӯгоҳи барқи оби Норақ тасдиқи худро ёфт. Таҳқиқоти визуализунонӣ ва мониторинги таҳшинишавии обовардҳо дар косаи обанбори Нерӯгоҳи барқи оби Норақ бо истифода аз маҷмӯи маълумоти Landsat бо сифати дараҷаи 1T (релефи ислоҳкардашуда), гузаронида шуданд, ки аз вебсайти EarthExplorer Хадамоти геологии ИМА (USGS) дастрас карда шуд.

Калимаҳои калидӣ: обанбор, таҳшинишавӣ, боришот, зондкунии дистансионӣ.

Abstract. In the present article, the techniques of assessing the siltation state of reservoirs are considered. One of the problems that hinders normal functioning of water reservoirs is the process of silting of not only the lake part of the reservoir, but also its river part by silt deposits. Continuous monitoring of the state of silting in reservoirs facilitates not only normal functioning of the whole complex of engineering constructions, but also, as a result, conditions for safe exploitation of these constructions can be created. Using the calculated Normalized Difference Water Index (NDWI) values from 1978 to 2019, the application of selected technique has proved valuable in monitoring of siltation process in the water reservoir of the Nurek HPP. The investigation on visualization and monitoring of sedimentation of reservoir bowl of the Nurek HPP are conducted using Landsat dataset as a level 1T (terrain corrected) that were collected from the US Geological Survey (USGS) via the Earth Explorer web site.

Keywords: water reservoir; siltation, precipitations, remote sensing.

С гидрологической точки зрения основное предназначение крупных водохранилищ многолетнего и сезонного регулирования, в том числе эксплуатируемых и строящихся в Таджикистане, это устранение природной неравномерности в многолетнем и внутригодовом распределении речного стока в интересах наиболее рационального его использования. Вместе с тем, крупные водохранилища Таджикистана, отличающиеся своей надежностью и безопасностью, обеспечивают высокую степень регулирования стока рек для нужд экономики Таджикистана и соседних государств, существенно снижая риски стихийных бедствий (наводнения, маловодье и т.д.) и ущербов от них.

В 2005–2008 годах обследование плотины и других ГЭС Нурекской ГЭС было проведено французской компанией «Электрисити Де Франс». Результаты обследования показали высокую надежность и устойчивость Нурекской плотины. Комплекс ГЭС Нурекской ГЭС, в 2009 году удостоился особого сертификата Международной комиссии по большим плотинам [1].

В водохранилищах руслового типа отложения наносов распределяются более

или менее равномерно, или приобретают вид гряды, постепенно передвигающейся из верхней части водохранилища к плотине. Процесс заиления водохранилищ носит затухающий характер, происходит повышение дна и уменьшение глубин в зоне кривой подпора. Установлено, что прекращение строительства Рогунской ГЭС, привело бы к постепенному заполнению емкости водохранилища Нурекской ГЭС наносами и в среднесрочной перспективе под вопросом оказались бы безопасность отдельных ГЭС гидрокомплекса. В долгосрочной перспективе, встал бы вопрос о безопасности данного гидроузла, в целом, и стало бы причиной невозможности регулирования стока р. Вахш [2].

Возведение Рогунского гидроэнергетического комплекса значительно снизит скорость заполнения водохранилища Нурекской ГЭС, тем самым обеспечить регулирование стока на значительный период времени, а также отсрочить необходимость реконструкции системы пропуска паводков с учетом проблем отложений, а также позволит продлить срок эксплуатации Нурекской ГЭС на срок эксплуатации Рогунской ГЭС. В

течение 115 лет эксплуатации работы Рогунской ГЭС, водохранилище будет заполнено наносами. По окончании данного цикла, водохранилище Рогунской ГЭС, будет эксплуатироваться как русловая электростанция и всё регулирование будет осуществляться на Нуреке, предполагая, что общий консервативный ежегодный расход наносов будет равен 100 млн. м³ [12]. При этом, Нурекская ГЭС будет работать в качестве контррегулятора, а Рогун - энергетическим компенсатором [3].

Детальные измерения дна водохранилища Нурекской ГЭС, в стационарных поперечниках по изучению внутреннего перемещения твердого стока из речной сети к озеровидной, в т.ч. в приплотинной зоне водоёма были проведены в 2000-2001гг. (апрель-октябрь месяцы). Установлено, что

суммарный (расчетный) объем тела заиления водохранилища в конце 2000 года составлял 2,053 км³. При этом основная часть влекомых и часть взвешенных наносов сосредоточилась в речной части, а значительная часть взвешенных наносов приходится на долю емкости уровня мертвого объема озёрной части водохранилища [4].

Таким образом, проблема заиления чащи водохранилищ и постоянное наблюдения за этим процессом носить актуальный характер. В свете вышеизложенного ниже приведены анализ и оценка, а также результаты исследований мониторинга заиления Нурекского водохранилища (Рис.1) с использованием современных методов дистанционного зондирования. Временной охват составляет с 1978 по 2019 гг.

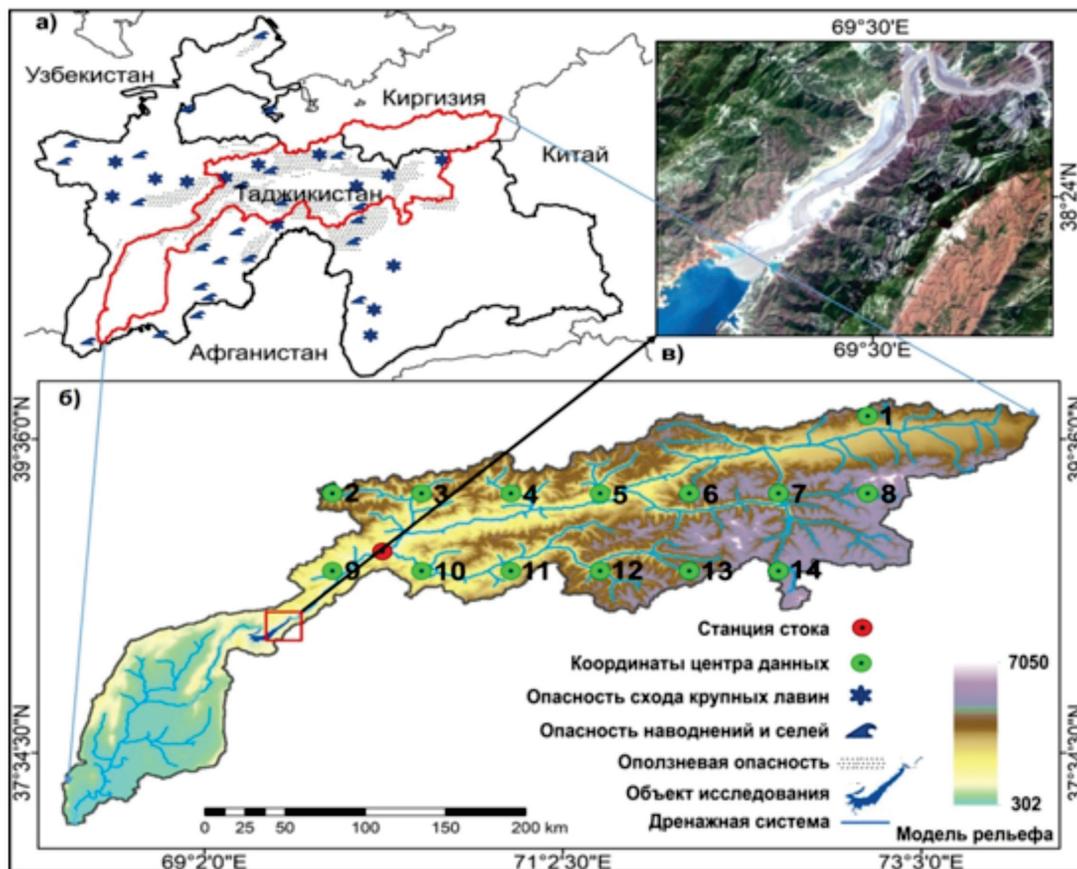


Рисунок 1 - Карта расположения исследуемого бассейна и проявления стихийных бедствий в Таджикистане, в частности в бассейн реки Вахи [источник-КООСПРТ] (а). Карта модели рельефа и дренажной системы (б). Изображение натуральной цветовой композиции исследуемого объекта (в).

Спутниковые данные, описывающие объект исследования, включают в себя снимки Landsat 2 MSS (L2MMS), Landsat 5 TM (L5TM) и Landsat 8 OLI (L8OLI). В данном исследовании, для расчета нормализованного разностного водного индекса (NDWI) было использовано по одному изображению L2MMS и L5TM (путь = 165, ряд = 033) и (путь = 153, ряд = 033), отснятыми 15 июля 1978 и 07 июля 1992 соответственно. А также, для этой же цели два изображения L8OLI (путь = 153, ряд = 033) отснятые 07 июля 2015 г. и 18 июля 2019 г. были использованы. Полученные мультиспектраль-

ные снимки включают в себя четыре полосы с пространственным разрешением 60 м для L2MMS, шесть полос с разрешением 30 м для L5TM и восемь полос по 30 м для L8OLI. Пакет использованных Landsat данных для расчета и анализа индекса воды был выбран в соответствии с записями наблюдений гидрологической станции учитывая максимальные значения водотока в бассейне реки Вахш с 2000 по 2013 гг. Анализ данных гидрологической станции в этом бассейне показывает, что максимальный водоток в исследуемом бассейне наблюдается в июль месяце (Рис. 2а).

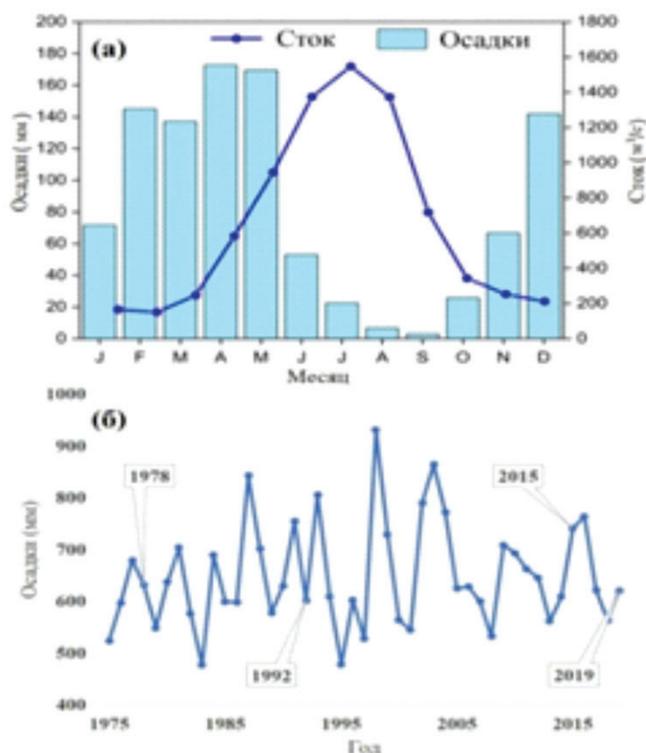


Рисунок 2 - Среднемесячные значения водотока и среднемесячные осадки по данным метеостанций в бассейне реки Вахш с 2000 по 2013 гг. [6] (а), и среднегодовые значения осадков по данным CRU TS в бассейне реки Вахш (б) с 1975 по 2019 гг.

В свою очередь, временной анализ значений индекса воды со спутниковых данных довольно сильно зависит от количества жидких осадков. Следовательно, для определения временных периодов с похожим среднегодовым уровнем осадков, в том числе и жидких осадков, был проанализирован набор метеорологических данных CRU TS

(временные ряды с координатной привязкой единиц климатических исследований), полученного с веб-сайта отдела климатических исследований (CRU). Данная организация признана одной из ведущих мировых институтов, занимающихся изучением естественных и антропогенных изменений климата. Набор данных CRU TS обеспечивает

ежемесячную сетку наземных (за исключением Антарктиды) наблюдений с высоким разрешением, начиная с 1901 года. Эти наблюдения включают температуру (TMP), осадки (PRE), дневной диапазон температур (DTR) и давление пара (VAP) [5]. Среднегодовые осадки с 1975 по 2019 в бассейне р. Вахш и выбранные временные периоды для нашего исследования показаны на Рис. 2(б).

Исследования по визуализации и мониторинга заилений наносов на исследуемом

объекте, выполнялись с использованием изображения Landsat, снятые 25 июня 1975, 08 мая 1999, 30 мая 2013 и 31 мая 2019 гг. (Рис. 3). Стоит также отметить, что последние снимки были сняты на пару месяцев раньше снимков, использованных для расчёта NDWI. Авторами использованы набор данных Landsat с качеством уровня 1T (исправленная местность), который получили из сервиса EarthExplorer - Геологической службы США (USGS).

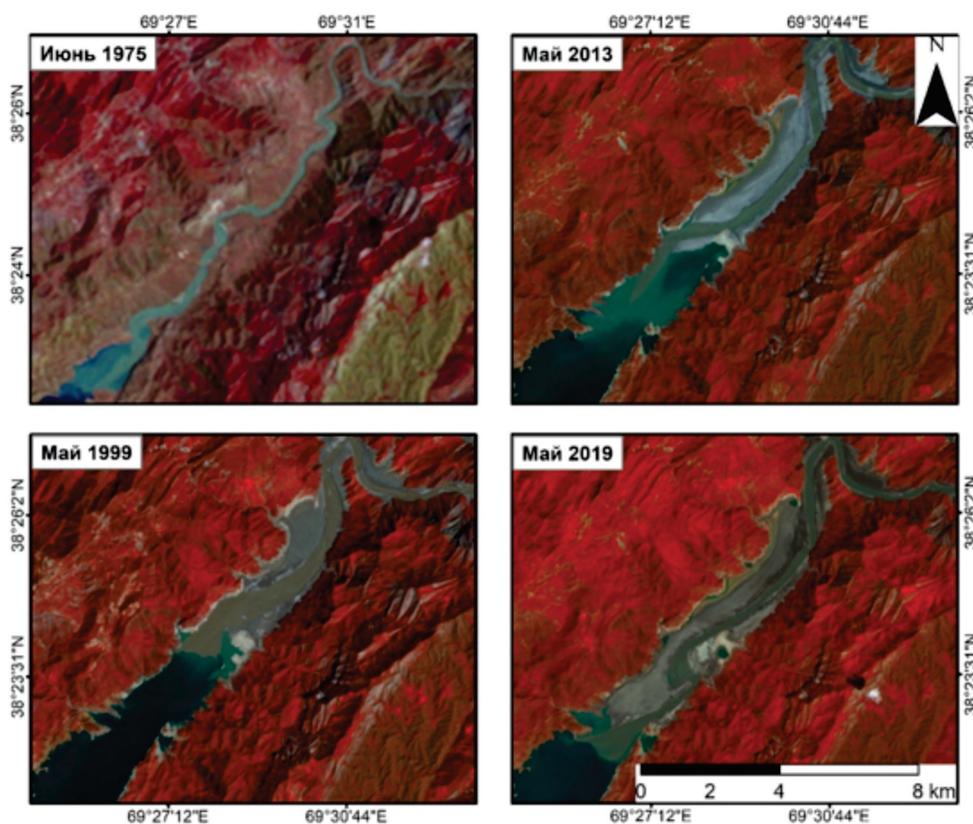


Рисунок 3 - Карта, показывающая динамику заиления водохранилища.

Нормализованный разностный водный индекс (NDWI) – это индекс, который был разработан для определения границ открытых водоемов и улучшения их проявления на цифровых изображениях дистанционного зондирования [7,8]. Как показано в уравнении (1), индекс NDWI является соотношением разности спектральной отражательной способности между ближней инфракрасной (NIR) и зеленой полосами к сумме отражательной способности ближней инфракрасной и зеленой полос:

$$NDWI = \frac{R_{GREEN} - R_{NIR}}{R_{GREEN} + R_{NIR}} \quad (1)$$

где R_{NIR} и R_{GREEN} - спектральные коэффициенты отражения в ближнем инфракрасном и зеленом диапазонах соответственно.

Для реализации процесса расчёта NDWI на основе уравнения (1), необходимо преобразовать цифровое число каждого пикселя изображений Landsat в зеленый и NIR диапазоне в спектральную отражательную способность. Для Landsat 2 и 5 необходимо пре-

где всего, преобразовать цифровое число в спектральное сияние:

$$L_{\lambda} = DN_{\lambda} \times G_{\lambda} + B_{\lambda} \quad (2)$$

где L_{λ} - спектральное сияние ($W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$), DN_{λ} - цифровое число, G_{λ} - коэффициент усиления при изменении масштаба ($W/(m^2$

$\text{sr } \mu\text{m})$), B_{λ} - коэффициент смещения при изменении масштаба ($W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$) для полосы λ . В таблице приведены коэффициенты масштабирования конкретных диапазонов для каналов 1 и 3 Landsat 2, а также каналов 2 и 4 Landsat 5, которые указаны в файле метаданных каждого изображения Landsat.

Таблица

Коэффициенты масштабирования конкретных диапазонов для каналов 1 и 3 Landsat 2 MSS, и каналов 2 и 4 Landsat 5 TM.

Диапазон	Landsat 2			Landsat 5		
	Индекс канала	G_{λ} ($W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$)	B_{λ} ($W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$)	Индекс канала	G_{λ} ($W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$)	B_{λ} ($W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$)
Green	Band 1	1.0598	-9.06	Band 2	1.4482	-4.29
NIR	Band 3	0.53386	4.07	Band 4	0.8760	-2.39

Полученное значение спектрального сияния L_{λ} из цифрового числа, можно использовать для вычисления коэффициента отражения R_{λ} от верхней части атмосферы (TOA). Преобразование спектрального сияния L_{λ} в коэффициент отражения R_{λ} было выполнено следующим образом:

$$R_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta} \quad (3)$$

где d - расстояние Земля - Солнце в астрономических единицах, $ESUN_{\lambda}$ - среднее солнечное экзо-атмосферное сияние ($W/(m^2 \mu\text{m})$) для диапазона λ ($ESUN_{\lambda}$ Landsat 2 MSS: Band 1 = 1829, Band 3 = 1268, $ESUN_{\lambda}$ Landsat 5 TM: Band 2 = 1796, Band 4 = 1031 [9]), θ - зенитный угол Солнца, который указан в файле метаданных каждого изображения Landsat.

Для двух использованных изображений Landsat 8 OLI, цифровое число предварительно преобразовано в спектральное сияние L_{λ} , поэтому, его можно напрямую использовать для вычисления коэффициента отражения R_{λ} (TOA) с использованием следующей формулы:

$$R_{\lambda} = DN_{\lambda} \times M_{\lambda} + A_{\lambda} / \cos \theta \quad (4)$$

где M и A - коэффициенты масштабирования для преобразования цифрового числа в коэффициент отражения в диапазоне λ , θ - зенитный угол Солнца в градусах, который указан в файле метаданных каждого изображения Landsat 8. Процесс вычисления коэффициента отражения TOA из цифрового числа Landsat 8 OLI не сложный, поскольку все диапазоны имеют одинаковые значения M и A , то есть $M = 2 \times 10^{-5}$, $A = -0,1$.

На снимках 1992 года среднее значение NDWI увеличивается до 0.31 (Рис. 4 и 5), с последующим увеличением зеркала водохранилища, достигающим 78.70 км² (Рис. 6). В последующем, в период от 1992 до 2015 гг. среднее значение NDWI снова снижается до 0.25, а затем вновь увеличивается до конца выбранного периода для анализов.

Как видно на рис. 6, с 1978 по 2015 гг. общая площадь зеркала водохранилища Нурекской ГЭС увеличилась на 34.68%. На наш взгляд, резкое увеличение площади водохранилища, в основном за счет увеличения его размеров по ширине, скорее всего, связано с повышением уровня заиливания за исследуемый отрезок времени.

Из-за начала перекрытия русла реки Вахш, в створе строительства Рогунской ГЭС (2016г.), общая площадь зеркала водо-

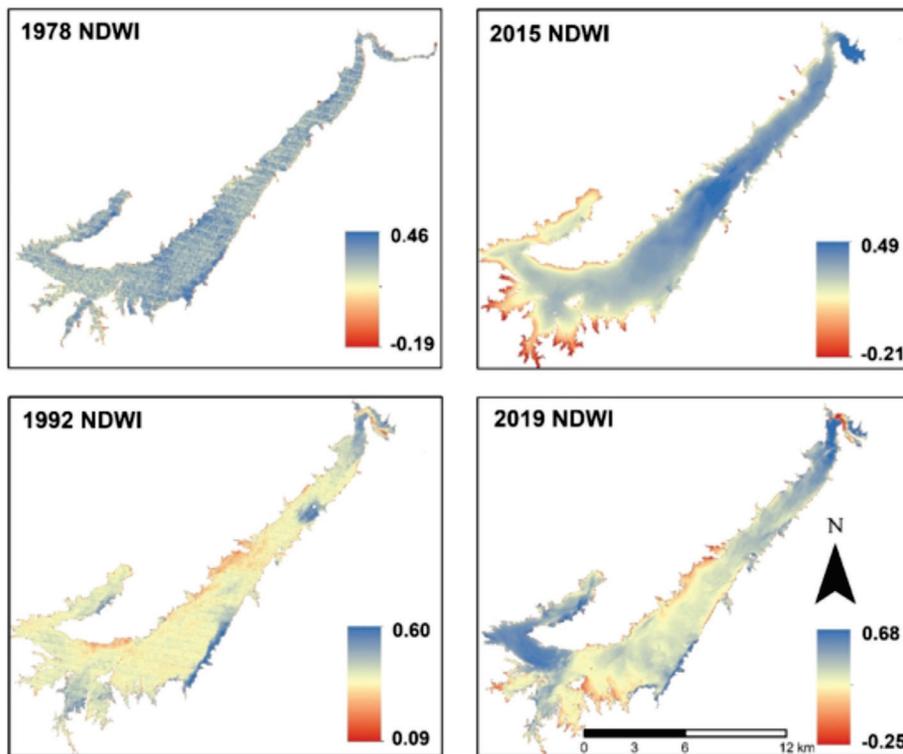


Рисунок 4 - Нормализованный разностный водный индекс (NDWI)

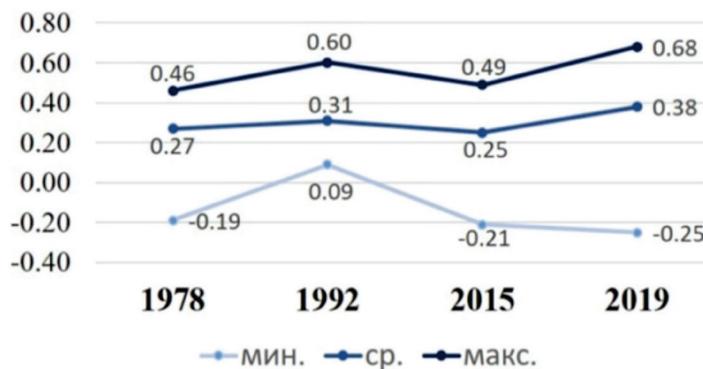


Рисунок 5 - Минимальные, средние и максимальные значения нормализованного разностного водного индекса.



Рисунок 6 - Значения площади зеркала водохранилища (км²) и его динамика в процентах.

хранилища Нурекской ГЭС уменьшилась, что может быть связано с перехватом транспортируемых рекой Вахш, основной части наносов, в чаше водохранилища Рогунской ГЭС.

Таким образом, на основании результатов исследований можно сделать однозначный вывод о том, что строительство Рогунской ГЭС, способствует уменьшению заиления водохранилища Нурекской ГЭС, тем самым обеспечивается не только безопасная его эксплуатация, но также, что не менее важно, в условиях усиления частоты экстремальных гидрологических явлений, за счет многолетнего регулирования и создания гарантированного запаса воды в водохранилище, имеющее межгосударственное значение, является не только источником электроэнергии, но также в качестве многолетнего регулятора будет удовлетворять нужды также орошаемого земледелия и экологии.

Литература

1. Безопасность плотин в Центральной Азии: создание потенциала и региональное сотрудничество / Европейская Экономическая Комиссия Женева Серия публикаций по водным проблемам №5 ООН, Нью-Йорк и Женева, 2007 год. - с.46. http://www.unecsc.org/fileadmin/DAM/env/water/publications/documents/Water_Series_Publication5_r.pdf.
2. Фазылов А.Р. Значение водохранилищ при комплексном регулировании и управлении водными ресурсами в условиях напряженного водохозяйственного баланса Центрально-Азиатского региона. - Вода для мелиорации, водоснабжения отраслей экономики и природной среды в условиях изменения климата. Часть 2: Сб. научн. трудов Сети водохозяйственных организаций Восточной Европы, Кавказа, Центральной Азии, вып. 12. - Ташкент: НИЦ МКВК, 2018. - 96с., с.45-61. http://www.cawater-info.net/library/rus/eccca_papers_collection_vol_12_2018.pdf
3. Оценка экологического и социального воздействия для Рогунской ГЭС OSHPC “Barki Tojik” / ОАХК «Барки Точик» PÖYRY ENERGY LTD. Rogun HPP ESIA / ОЭСВ РОГУНСКОЙ ГЭС Date 2014-06-17 ОЭСВ (проект)//<http://rogunges.tj/rus/media/docs/prerus.pdf>.
4. Ёров А.Ё. Инструментальные исследования процесса заиления водохранилища Нурекской ГЭС [Текст] / А.Ё. Ёров, Х. Ибодзода, С.Н. Рахимов // Материалы Международной научно-практической конференции «Математические проблемы технической гидромеханики, теории фильтрации и орошаемого земледелия» посв. 70-летию докт. техн. наук, профессора Саттарова М.А. (27-28 мая 2008г., г. Душанбе, Таджикистан). -Душанбе, 2008. -с.28-32.
5. Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P. & Lister, D.H. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data* 7, 109 2020.
6. Gulakhmadov A. et al. Simulation of the Potential Impacts of Projected Climate Change on Streamflow in the Vakhsh River Basin in Central Asia under CMIP5 RCP Scenarios //Water. – 2020. – Т. 12. – №. 5. – p. 1426.
7. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *International journal of remote sensing*. – 1996. – Т. 17. – №. 7. – p. 1425-1432.
8. Gao B. C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote sensing of environment*. – 1996. – Т. 58. – №. 3. – p. 257-266.
9. Chander, G.; Markham, B.L.; Helder, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS < TM, ETM+, and EO-1 ALIO sensors. *Remote Sens. Environ.* 2009, 113, 893–903.