

УДК 004.9:519.876.5
МРНТИ 28.17.33

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2026-23-1-117-131>

¹Зарубин М.Ю.,

к.т.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-1415-5244,
e-mail: zarubin_mu@mail.ru

^{1*}Зарубина В.Р.,

к.э.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-1376-9172,
*e-mail: zarubina_v@mail.ru

²Ысқақ А.У.,

к.с.-х.н., ORCID ID: 0000-0002-8313-8982,
e-mail: yskak_aliya@ksu.edu.kz

²Ермолдина Г.Т.,

магистр, ORCID ID: 0000-0003-2143-7618,
e-mail: gulnazyermoldina@gmail.com

¹Костанайский инженерно-экономический университет им. М. Дулатова,
г. Костанай, Казахстан

²Костанайский региональный университет им. А. Байтұрсынұлы,
г. Костанай, Казахстан

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАРАТОМАРСКОГО И ВЕРХНЕТОБОЛЬСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА)

Аннотация

В последние годы Казахстан столкнулся с серьезными проблемами как недостатка воды, так и эксплуатации имеющихся гидротехнических сооружений: периоды засухи приводят к систематическому снижению накопленных запасов пресной воды, а паводок 2024 г. привел к затоплению ряда населенных пунктов. Для понимания реальной картины состояния имеющихся гидротехнических сооружений и находящихся в этих водохранилищах водных запасов, а также прогнозирования потенциальных рисков правительством инициирован ряд исследований. В свете возросшей актуальности проблемы понимания достоверной картины состояния гидротехнических сооружений авторами в статье поднимаются вопросы оценки точности компьютерного моделирования состояния водохранилищ региона (на примере Каратомарского и Верхнетобольского водохранилищ). В исследовании батиметрия Каратомарского водохранилища выполнена с помощью дрона Arasche 3. Исследование закономерностей точности моделирования от частоты галсов проводилось с использованием методов кригинга. Модели водохранилища строились в QGis и Surfe. При анализе береговой линии использовались космические снимки Sentinel-2 и данные «Казводхоза». Результатом исследования стал алгоритм определения плотности (шага) галсов гидродрона для современной геоморфологии дна. Исследования показали, что точность исследования даже равнинных гидротехнических сооружений Казахстана существенно зависит от параметров проведения полевых исследований, а сами гидротехнические сооружения за период эксплуатации претерпели существенные изменения.

Ключевые слова: батиметрия, интерполяция, 3D-моделирование, Каратомарское водохранилище, Тобол, Аят.

Введение

Гидротехнические сооружения и создаваемые ими водохранилища играют важную роль в мировом круговороте воды, регулируя поступление воды из окружающей среды в искус-

ственные системы. Например, около 57% сезонной изменчивости мировых поверхностных пресных вод (ПВП) компенсируется водохранилищами [1].

Как правило, после введения водохранилищ в эксплуатацию, их регулярной батиметрии и изучению изменений морфологии дна специалистами уделяется неоправданно мало внимания. Обычно исследования и описания таких объектов ограничиваются только типом, формой, опорными уровнями, размерами ложа и проектным объемом воды в них. Из внимания зачастую упускаются моменты старения: накопления в чаше объекта донных отложений [2], эвтрофикации [3], повышения эмиссии парниковых газов [4], нарушение седиментационного баланса [5], увеличения риска индуцированных землетрясений [6]. И это все помимо снижения биологического разнообразия [7], повышения техногенных рисков [8] и связанного с этим роста социально-экономических проблем [9].

В то же время эффективный мониторинг состояния водохранилищ необходим для решения широкого круга практических задач, таких как моделирование и прогнозирование защитных мероприятий от паводков, планирование ирригационных и техногенных нагрузок, оценка долгосрочных последствий влияния этих сооружений на глобальный климат [10, 11].

После серии весенних наводнений регионов Казахстана и России 2024 г. в Казахстане мониторинг состояния водных ресурсов, и особенно фактического состояния гидротехнических сооружений, вынесен в разряд приоритетных задач правительства и осуществляется на государственном уровне [12]. Данный факт послужил основной причиной привлечения коллектива авторов к исследованию каскада водохранилищ в Костанайской области, в том числе Каратомарского и Верхнетобольского водохранилищ.

Представленная работа авторов посвящена следующим основным исследовательским вопросам:

- ♦ в-первых, насколько точно проводимые исследования передают рельеф водохранилища после интерполяции батиметрических данных?
- ♦ во-вторых, с какой необходимой плотностью измерений следует проводить полевые исследования чаш равнинных водохранилищ для достижения требуемой точности 3D-моделирования?

Для решения поставленных задач авторами проводились исследования по данным батиметрической съемки зарегулированного объема Каратомарского водохранилища на площади 61 км² и Верхнетобольского водохранилища на площади на площади 74,25 км².

Предварительная батиметрия водохранилища коллективом авторов проведена в июле 2024 г. Уточняющая дополнительная съемка данных недообследованных полигонов – в летний период 2025 г. Вычисление необходимой плотности исследований, детальная батиметрия и построение цифровой модели выполнено на данных 2024–2025 гг.

Планирование плотности измерений (плотности галсов гидродрона) в исследовании осуществлялось по данным эталонного полигона водохранилища посредством оценки точности полученных моделей (моделей с различной плотностью галсов гидродрона). Интерполяция данных осуществлялась тремя различными методами: линейной интерполяцией, Planar Regression и простым крикингом. По результатам оценки точности методов, крикинг выбран для построения итоговой 3D-модели водохранилища.

Оценка достоверности результатов вычисления зависимости необходимой плотности измерений от параметра заданной точности моделирования оценена посредством сравнения точности различных моделей для тестового и контрольного полигонов реки Аят.

Проверка достоверности результатов исследования осуществлена посредством сравнения полученных данных батиметрии/моделирования с данными контрольных точек, полученных ручными методами измерений.

Предложенный авторами подход представляет собой надежное решение для планирования требуемой точности батиметрии посредством определения необходимой плотности измерений. С практической точки зрения подход позволил установить более достоверные значения

соотношения «уровень воды – площадь – объем» для Каратомарского и Верхнетобольского водохранилищ Республики Казахстан.

Подход подразумевает возможность тиражирования методов исследования на любые равнинные водохранилища.

Для понимания возможностей различных методов съемки в разрезе вопроса точности дальнейшего компьютерного моделирования гидротехнического сооружения был проведен анализ различных современных методов цифрового моделирования подводного рельефа водоемов (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный обзор методов батиметрического и топографического исследования водохранилищ по литературным источникам

| Ссылка | Название/Краткое описание метода | Необходимое оборудование | Преимущества | Недостатки |
|--|--|--|---|---|
| Ручные методы измерения глубин и топографической съемки рельефа дна водохранилища | | | | |
| - | Метод основан на измерении длины лотиния с борта судна. | Ручной лить, судно. | Простота и доступность единичных измерений. | Низкая скорость и точность измерения глубины водоема |
| [13] | Теодолитная съемка. | Теодолит, стальная измерительная рулетка (или оптический дальномер). | Доступность единичных измерений. | Низкая скорость измерений, ограниченные размеры теодолитных ходов (полигонов), сложность проведения работ на труднодоступных склонах русла реки. |
| | Тахеометрическая съемка. | Тахеометр. | | |
| | Мензольная съемка. | Мензула. | | |
| | Нивелирование поверхности (вертикальная или высотная съемка). | Нивелир. | Высокая точность. | |
| | Фототеодолитная съемка рельефа береговой линии (наземная). | Фототеодолит. | | |
| Методика автоматизированной батиметрической и топографической съемки рельефа прибрежной зоны водохранилища | | | | |
| [24] | Гидроакустическое зондирование подводной части водоема. | Эхолот, судно/ гидродрон, датчики положения. | Возможность сбора больших объемов данных с высокой точностью. | Невозможность проведения измерений на заросших участках водохранилища. |
| [25, 26] | Фототеодолитная съемка рельефа береговой линии (аэрофотосъемка). | Самолет (дрон), аэрофотоаппарат. | Возможность получения планов больших площадей | Необходимость дополнительного планирования и проведения референциальных работ по опорным точкам. Зависимость точности измерений от плотности растительного покрова. |
| [27] | Лазерное сканирование рельефа береговой линии. | Лидар, дополнительно: самолет (дрон) для аэрофотосъемки + датчики положения. | Получение топографических планов сложных профилей. Высокая точность Скорость измерений. | Чувствительность качества измерений к работе с отражающими поверхностями. |

Продолжение таблицы 1

| Методы дистанционного спутникового зондирования и цифрового моделирования водных объектов | | | | |
|---|---|--|---|---|
| [18, 22] | Группа методов космической радиолокационной альтиметрии | Для определения глубины требуются данные спутникового LiDAR и данные полевых исследований. | Получение топографических планов сложных профилей. Высокая точность и скорость измерений. | Зависят от облачности и погодных условий. Сложность высокоточных измерений построения подводного рельефа. |
| [23, 28] | Группа методов реконструкции и прогнозирования батиметрии с использованием космических данных и глобальных моделей. | Требуются данные космической фотосъемки. | Возможность построения полного рельефа дна чаши водохранилища дна. | Методы часто не учитывают сложную батиметрию водоема. |

Ручные методы, такие как буссольная съемка и глазомерная съемка в топографических методах, авторами не рассматривались в связи с тем, что в настоящее время они, как и большинство ручных методов, постепенно выходят из употребления [13], да и из-за небольшого объема исходных данных могут обеспечить невысокую точность моделирования.

Первоначальные попытки определения подводного рельефа водоемов с использованием методов дистанционного зондирования основывались на методах [14–17]. Вопросы применения и оценки точности современных успешных методов дистанционного зондирования для оценки батиметрии водоемов систематизированы в работах [18, 19].

Систематизируя результаты анализа космических дистанционных методов, можно сказать, что существующие методы оценки состояния водоемов можно условно представить в виде двух больших групп [20, 21]. Первая категория объединяет методы обработки спутниковых изображений:

- MODIS [18]
- Landsat [22]
- Sentinel-2 [22]

для отслеживания изменений площади водной поверхности объекта с помощью радиолокационной альтиметрии. Эта группа высокоточных методов, однако их применимость ограничена из-за сложности сканирования подводного рельефа.

Вторая группа методов основана на попытке реконструкции батиметрии водоема [23], что позволяет оценить полный рельеф объекта. Однако эта группа методов часто опирается на чрезмерно упрощенные предположения для реконструкции батиметрии, что приводит к снижению точности в условиях сложного рельефа водоема [21].

Рассмотрены вопросы методологии «склеивания» интерполяционных данных подводного и прибрежного рельефа при построении цифровых карт водоемов [27].

Ключевым моментом при построении адекватных поставленным задачам 3D-моделей остается выбор оптимальных для заданного водоема и набора данных методов интерполяции и определение минимально достаточного количества точек этих исходных данных. Использование чрезмерно упрощенных подходов для интерполяции может свести на нет результаты исследований из-за существенной потери точности.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись два крупнейших гидротехнических сооружения каскада водохранилищ Северного Казахстана – Каратомарское и Верхнетобольское водохранилища, расположенные в Костанайской области Республики Казахстан. Первое водохранилище создано в месте слияния рек Тобол и Аят, второе – на реке Тобол (рисунок 1).

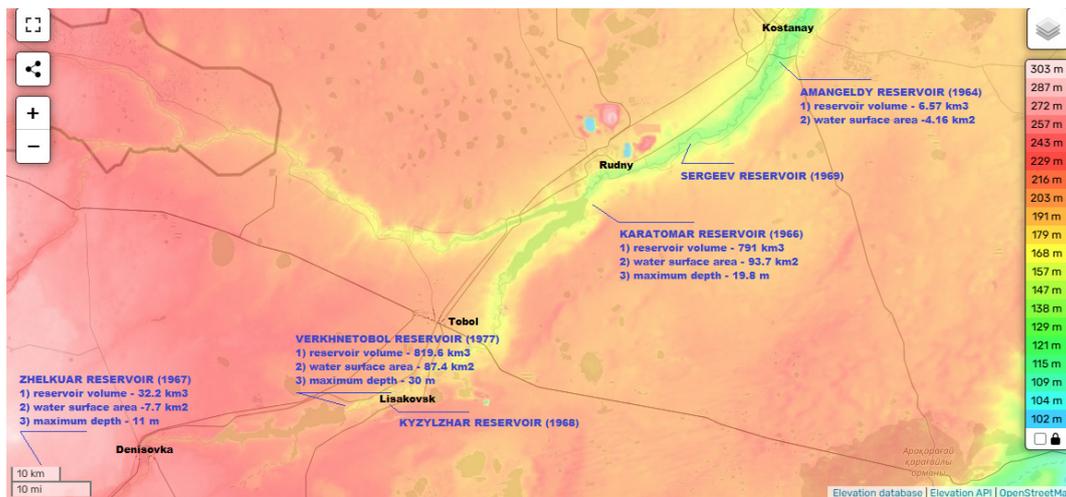


Рисунок 1 – Схема гидротехнических сооружений Костанайской области

Батиметрические измерения на участках исследований проводились в июле-августе 2024 г. и уточнялось летом 2025 г. Батиметрические исследования проводились с использованием автономного гидродрона Apache 3 с однолучевым одночастотным эхолотом.

Данные контрольных замеров глубин водохранилищ для верификации результатов автоматизированных батиметрических измерений/моделирования получены ручным методом с помощью линя и гидрометрической рейки.

Таким образом анализ достоверности данных проведен путем сравнения результатов измерения двумя методами (ручным и с использованием однолучевого эхолота).

Для Каратомарского водохранилища в процессе настройки точности эхолота гидродрона были определены поправки эхолота на акватории залива Каратомарского водохранилища методом калибровки. Работа выполнялась с использованием калибровочного диска и гидрометрической рейки. Настройка точности производилась путем задания параметров на глубинах 1, 3 и 5 м данного водоема (залива водохранилища), плюс дополнительно в зонах выявленных глубин на 10 и 15 м для самого водохранилища.

Для дополнительной проверки как результатов измерений, так и оценки точности 3D-моделирования авторами был проведен ручной сбор данных глубин контрольных точек водохранилища опять же с помощью линя и гидрометрической рейки. Данные проведенных ультразвуковых измерений с помощью батиметрического дрона и ручных методов измерений совпали с погрешностью менее 0,1 м. Отклонение данных моделирования от ручных методов измерения также не превысило требуемых 10%. Что подтвердило успешность калибровки дрона и верифицировало точность и достоверность проводимых измерений/моделирования.

Для Верхнетобольского водохранилища первичные настройки выполнены аналогичным образом.

Гидролокатор батиметрического гидродрона прошел государственную поверку в 2024 г. Аппарат сертифицирован к использованию на всей территории Республики Казахстан.

Для получения максимальной точности первичных данных и повышения эффективности использования гидродрона была проведена геопривязка с помощью DGPS. Использовалась GPSS-станция CNCNAV. Станция получила сертификат соответствия Республики Казахстан.

Маршруты движения гидродрона строились в программном продукте AutoPlanner 2.0.11.9341. Использовалась система координат WGS84. Предварительная обработка полученных батиметрических данных проводилась в свободно распространяемом ГИС-пакете QGIS v 3.34.11. В этом же пакете были получены разрезы и обработана цифровая модель чаши водохранилища.

Урез воды Каратомарского водохранилища построен с использованием наложенного снимка Sentinel-2_L2A_True_color от 07.04.2024, соответствующего заполнению чаши водохранилища на 98% (по данным фонда «Казводхоз»). Ниже приведено сравнение качества имеющихся космических снимков от 14.06.2024 и 07.04.2024 с разрешением 30 м/пиксель. Качество снимков определяется облачностью в день проведения космической съемки над объектом исследований. Наилучшие показатели качества имеет снимок от 07.04.2024 (рисунок 2).



Рисунок 2 – Фрагменты снимков Sentinel-2_L2A от 14.06.2024 (а) и 04.07.2024 (б) при построении береговой линии Каратомарского водохранилища, классифицированный снимок водохранилища в формате NDWI с контурированием (в) и зона контурирования водной поверхности на топографическом плане (г)

В качестве основы для определения береговой линии и определения максимального заполнения чаши Верхнетобольского водохранилища был выбран также снимок SENTINEL-2 S2B_MSIL2A с датой 10.05.2024 и имеющий процент облачности (PIXEL_CLOUD_PERCENTAGE) меньше 10% (рисунок 3).

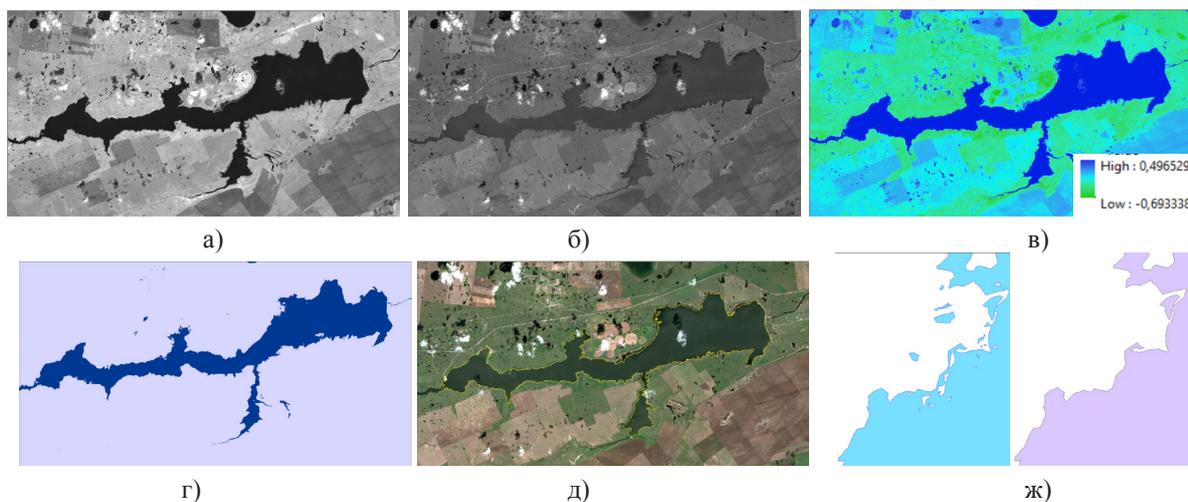


Рисунок 3 – Вычисление Normalized Difference Water Index (NDWI) и переклассификация растровой поверхности: а) канал Near infrared (Band 8); б) канал Green (Band 3); в) вычисленный индекс NDWI; г) переклассификация раstra на водные и остальные объекты; д) конвертирование раstra в полигональный слой; ж) результат проверки геометрии и исправлении топологических ошибок (правила must not overlap и must not have gaps)

Дополнительно для верификации измерений и повышения точности построения линии уреза воды были обработаны пакеты по три космических снимка с усреднением полученной линии уреза воды.

Выявлено, что уменьшение площади водной зоны Каратомарского водохранилища на снимках Sentinel-2_L2A NDWI (Normalized Difference Water Index) по сравнению со снимками Google и Sentinel-2_L2A_True_color вызвано значительным зарастанием русла реки камышом

(тростником) в границах начала водохранилища (даже несмотря на максимальный подъем уровня воды в водохранилище за последние 10 лет). Сокращение площади водного зеркала Верхнетобольского водохранилища на 15,06% вызвано также зарастанием и заиливанием мелководья.

Длина линии уреза воды Каратомарского водохранилища составила 93,77 км, что при разрешении фотоснимка 30 м/пиксель соответствует сформированной погрешности оконтуривания площади зеркала водохранилища не более 5,63 км². Для Верхнетобольского водохранилища длина линии уреза – 125,1 км.

Все используемые цифровые модели водоемов построены на детерминированных и гео-статических методах интерполяции [29]. Интерполяция по исходным данным и моделирование поверхностей чаш водохранилищ выполнены в программном продукте Surfe. Интерполяция данных осуществлялась тремя различными методами: линейной интерполяцией, Planar Regression и простым крикингом. По результатам оценки точности методов, крикинг выбран для построения итоговых 3D-моделей водохранилищ.

Результаты и обсуждение

При проведении исследования водоема методом инструментальной батиметрии вопрос выбора шага измерения (в случае гидроакустических измерений – шага галса гидродрона для снятия точек измерений с требуемой заранее заданной точностью) является особенно важным для достижения требуемой точности построения итоговой 3D-модели объекта. В части шага измерения на курсе такой задачи не возникает, так как оборудование судна позволяло получать точки с избыточной плотностью – дрон позволяет получать более 10 точек на метр пройденного пути.

В связи с достаточно сложными гидрометеорологическими условиями на момент начала исследований (июль 2024 г. характеризовался средними скоростями ветра от 13 до 25 м/с или от 6 до 8 баллов по шкале Бофорта [30]) было принято решение провести первоначальную оценку необходимого шага галсов гидродрона для обеспечения требуемой точности измерений на заливе водохранилища (точнее, в устье русла сезонно частично пересыхающего ручья, впадающего в Каратомарское водохранилище (рисунок 4).

Объект характеризуется длиной около 900 м, шириной 100–140 м и интервалом глубин до 6,4 м (рисунок 4). По результатам измерений в полигоне расположения разрезов уклон дна залива по направлению течения составляет 2,6-5,8 ‰, поперек фарватера залива – 6,08 ‰ в сторону левого берега.

Эталонный объект (полигон), как и водохранилище, является проточным, но высота волн существенно меньше, чем на основной чаше водохранилища, что позволило снизить риски и облегчить проведение батиметрических съемок.

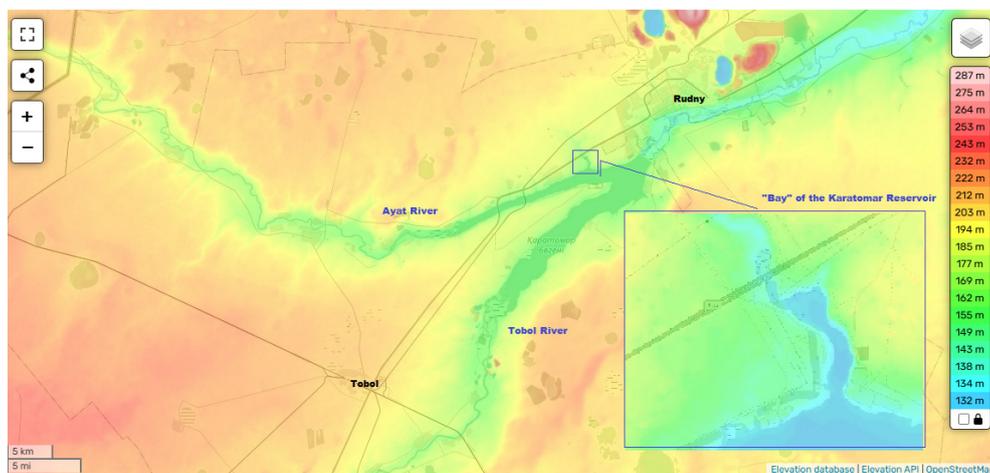


Рисунок 4 – Каратомарское водохранилище и эталонный полигон

Для исследований на водном объекте выбран в центральной зоне прямоугольный полигон в районе туристической базы «Параллель» (рисунок 5).



Рисунок 5 – Космоснимок исследовательского полигона и схема расположения сечений полигона

Размер полигона составляет 80x130 м, где 130 м – сторона поперек течения. Минимальная измеренная глубина по данным гидродрона – 3,55 м, максимальная – 4,98 м.

Для оценки применимости расчета на эталонном полигоне для Каратомарского водохранилища была проведена оценка корреляции профиля дна эталонного полигона с полученными в результате батиметрии профилями дна рек Тобол и Аят в границах водохранилища (рисунок 6). Для оценки использовались коэффициент корреляции и индекс подобия кривых [31].

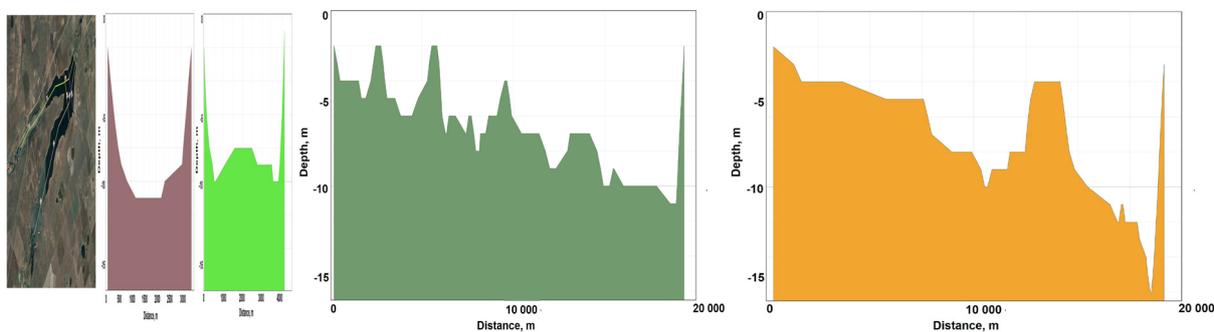


Рисунок 6 – Схема расположения сечений по Каратомарскому водохранилищу и сами сечения P1 и P2 в QGIS

Построенный профиль P1 по руслу реки Аят позволяет говорить об уклоне дна $0,5^{\circ}/_{\infty}$. Рельеф богат водоворотами.

Построенный профиль по руслу реки Тобол позволяет утверждать, что современный уклон дна составляет $0,8^{\circ}/_{\infty}$. Рельеф достаточно сглаженный.

Результаты вычисления коэффициента корреляции сведены в таблицу 2.

По данным таблицы видим высокую корреляцию между значениями рельефа дна (глубинами) в средней части реки Аят (в границах водохранилища) и глубинами в средней части (проточная часть эталонного полигона), что позволяет говорить о применимости предлагаемого полигона для реки Аят.

Корреляция данных по реке Тобол с глубинами полигона получилась идентичной значениям по реке Аят.

Для того чтобы доказать, что кривые, представляющие геометрию рельефа дна эталонного полигона и русел исследуемых рек подобны, в дополнение к коэффициенту корреляции было решено использовать коэффициент подобия кривых. Для этого проверялась вероятность того, что одно рельефное сечение может быть преобразовано в другое путем масштабирования по оси глубины, т. е. проверялось, что сечения геометрически подобны.

Для этого использовалась модифицированная формула для доказательства подобия кривых:

$$y_1 = k \cdot y_2, \quad (1)$$

где y_1 и y_2 – глубины опорного и сравниваемого участков;

k – коэффициент подобия кривых.

Все линейные размеры одной кривой должны быть пропорциональны аналогичным размерам другой кривой с тем же коэффициентом подобия. Тогда математически это можно выразить через соответствие координатных точек двух кривых:

$$k = \min(y_1 / y_2). \quad (2)$$

Результаты оценки подобия сечения при разных плотностях шага измерений двух рельефов сведены также в таблицу 1.

Таблица 2 – Коэффициент корреляции Пирсона и коэффициент подобия кривых рельефа, измерения MSE и MRD

| Параметр | P1 | | | P2 | | | P3 | | | P4 | | |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 25 | 50 | 100 | 25 | 50 | 100 | 25 | 50 | 100 | 25 | 50 | 100 |
| Шаг галса | 25 | 50 | 100 | 25 | 50 | 100 | 25 | 50 | 100 | 25 | 50 | 100 |
| MSE | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.19 | 0.21 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| MRD | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.04 |
| Коэффициент Пирсона | 0.93 | 0.69 | 0.85 | 0.90 | 0.94 | 0.87 | 0.60 | 0.44 | 0.57 | 1.00 | 0.99 | 0.96 |
| Коэффициент подобия кривых | 0.99 | 0.97 | 0.96 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.94 | 0.92 | 0.98 | 0.97 | 0.95 |

Для получения ответа на исследовательский вопрос, с какой необходимой плотностью измерений следует проводить полевые исследования чаш равнинных водохранилищ для достижения требуемой точности 3D-моделирования, произведена оценка точности моделирования с различными плотностями галсов гидродрона (шаг в 10 м выбран эталонным, исследованы значения точности при шаге 25, 50 и 100 м).

Для этого в первую очередь проведено исследование доступных методов интерполяции данных на их влияние на точность получаемых моделей (таблицы 3–4).

Во-первых, все методы, используемые при интерполяции геоданных, можно разделить на точные (ORB, RBF) и неточные – чаще всего стохастические (LPI, KSB, Kriging). В точных жестких методах в каждой выходной позиции интерполированная поверхность будет иметь точно такое же значение, как и значение входных данных, в то время как некоторые являются нежесткими, с возможностью отклонения интерполированного значения от значения, определенного в данной точке [45]. Также следует учитывать, что для некоторых решений важно учитывать не только интерполированные значения, но и неопределенность (изменчивость), связанную с этой интерполяцией [46]. Методы интерполяции также различаются по сложности, которая может быть измерена числом предположений, которые необходимо выполнить для проверки модели, и по вычислительной сложности, которая характеризуется объемом математических преобразований и элементарных машинных операций.

Для ответа на вопрос интерполяция данных при построении цифровой модели и построении батиметрической карты выполнялась с использованием трех различных математических

методов: линейной интерполяции (метод средних отрезков), линейной регрессии $Z = AX + BY + C$ и простого кригинга.

В качестве инструментов оценки качества интерполяции повторно выбраны стандартная средняя квадратическая ошибка (MSE) и максимальное относительное отклонение (MRD). MSE позволяет оценить качество аппроксимации на всем интервале.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (h_{Original} - h_{Forecast})^2}{N} \quad (3)$$

MRD дает пиковые отклонения и позволяет оценить качество аппроксимации в наихудшей точке.

$$MRD = \max \left(\left| \frac{h_{Original} - h_{Forecast}}{y_{Original}} \right| \right) \quad (4)$$

Метод линейной интерполяции является самым простым и часто используемым. Метод не зависит от количества узлов (при добавлении узлов нет необходимости пересчитывать все значения). Из явных достоинств следует отметить достаточно точные результаты в случаях, когда изменение значений интерполируемых глубин относительно равномерное и предсказуемое.

Однако у метода линейной интерполяции есть существенный недостаток – график функции не является гладким и зачастую существенно отклоняется от истинных значений глубин.

Кригинг по сравнению с исследуемыми методами дает наилучшее линейное несмещенное предсказание промежуточных значений при правильно выбранных априорных предположениях. Также кригинг минимизирует дисперсию ошибки измерения.

Таким образом, во-первых, кригинг обеспечивает требуемую гладкость интерполируемого рельефа, характерную для медленно текущих равнинных рек, во-вторых, возможность учета потенциальных шумов и пропущенных данных, и, в-третьих, имеет приемлемые показатели вычислительной сложности (максимальное время батиметрических расчетов на компьютере на базе процессора Intel i7-13700K с 8 ГБ оперативной памяти не превысило 30 минут).

Таблица 3 – Оценка глубины эталонного полигона различными методами интерполяции

| Параметр | Глубина (Minimum) | | | | Глубина (Maximum) | | | |
|---|-------------------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
| | 10 | 25 | 50 | 100 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| Шаг галса | | | | | | | | |
| Метод интерполяции: | | | | | | | | |
| Linear | 0.800 | 0.400 | 0.130 | 1.540 | 5.540 | 5.250 | 5.490 | 5.360 |
| Planar Regression: $Z = AX + BY + C$ | 0,1353 | 0.009 | 0.016 | 0.001 | 3.054 | 1.073 | 1.096 | 0.707 |
| Kriging | 1.573 | 1.141 | 1.007 | 2.727 | 5.550 | 5.419 | 5.919 | 5.348 |

Таблица 4 – Оценка средней глубины и погрешности методов интерполяции

| Parameter | Глубина (Mean) | | | | MSE (Relative Mean Diff) | | | |
|---|----------------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|
| | 10 | 25 | 50 | 100 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| Шаг галса | | | | | | | | |
| Метод интерполяции: | | | | | | | | |
| Linear | 4.225 | 4.216 | 4.274 | 4.301 | 0.112 | 0.106 | 0.105 | 0.161 |
| Planar Regression: $Z = AX + BY + C$ | 2.245 | 0.313 | 0.320 | 0.288 | 0.164 | 0.359 | 0.301 | 0.342 |
| Kriging | 4.298 | 4.261 | 4.343 | 4.367 | 0.119 | 0.102 | 0.107 | 0.105 |

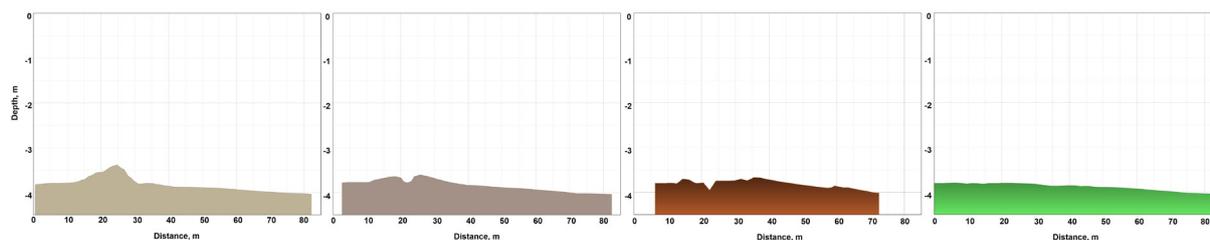


Рисунок 7 – Геометрия рельефа дна участка P1 эталонного полигона (по течению, правый край) при разных плотностях галсов (через 10, 25, 50 и 100 м). Максимальная глубина – 4,03 м.

Исходя из формы рельефа разрезов видно, что с увеличением галса батиметрического дрона до 50 м начинают теряться локальные экстремумы дна залива (неопознанные подводные объекты). Хотя при достаточно ровном дне и отсутствии затопленных подводных объектов коэффициент корреляции Пирсона составляет около 0,9.

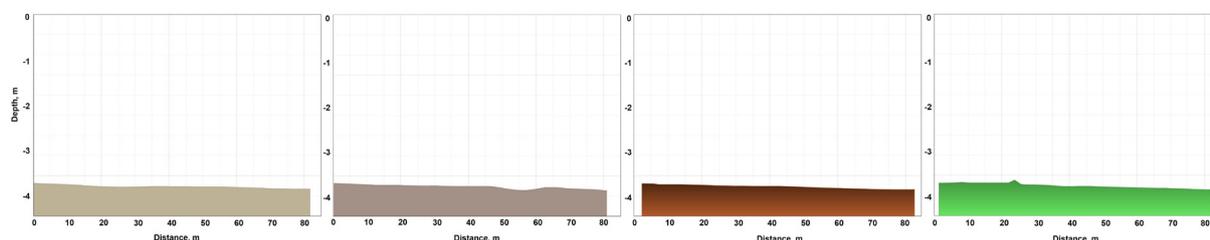


Рисунок 8 – Геометрия рельефа дна участка P2 эталонного полигона (по течению, центр) при разных плотностях галсов (через 10, 25, 50 и 100 м).

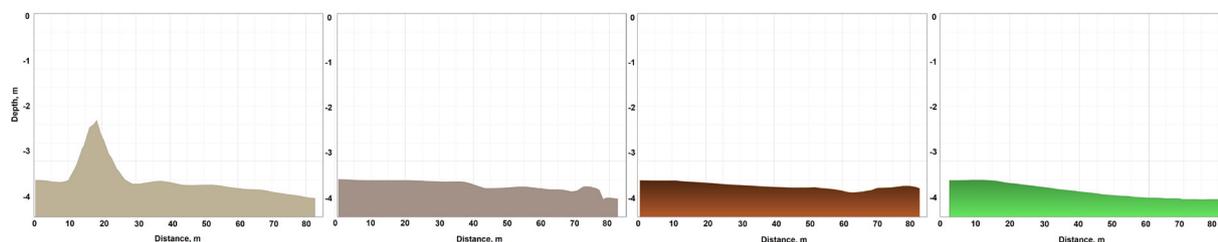


Рисунок 9 – Геометрия рельефа дна участка P3 эталонного полигона (по течению, левый край) при разных плотностях галсов (через 10, 25, 50 и 100 м).

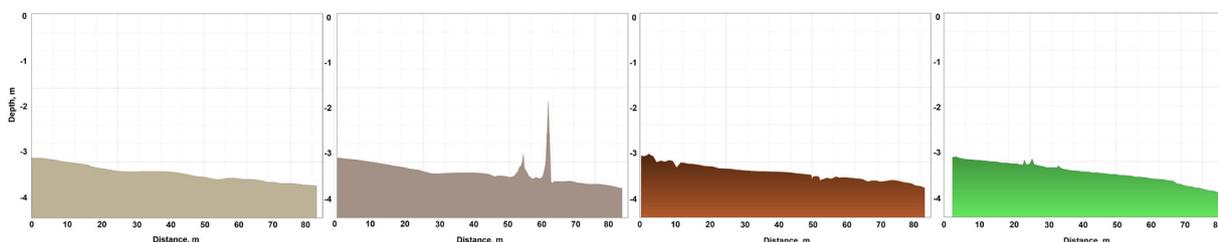


Рисунок 10 – Геометрия рельефа дна участка P4 эталонного полигона (поперек течения) при разных плотностях галсов (через 10, 25, 50 и 100 м).

Полученный массив данных был оценен в рамках доверительного интервала. Для повышения качества исходных данных и исключения влияния случайных шумов была проведена предварительная обработка и из входного массива были удалены данные пульсаций, не удовлетворяющие правилу трех сигм (вероятность ошибочного удаления данной пульсации не превышает 0,28%).

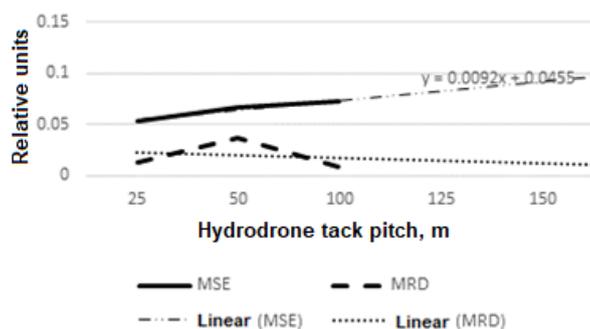


Рисунок 11 – Прогноз изменения MSE и MRD для эталонного полигона от плотности галсов

Таким образом, на основании проведенных расчетов (рисунок 11) можно утверждать, что для обеспечения заявленной точности не менее 10% необходимо провести натурное обследование акватории водохранилища с шагом галса не более 200 м.

Для верификации результатов авторами в районе села Набережного была произведена батиметрия отдельных полигонов русла реки Аят с плотностью галсов 50, 100, 200, 300, 400 и 500 м (данные которых не были включены в итоговую 3D-модель водохранилища). Анализ точности полученных данных подтвердил ранее полученные выводы о минимально необходимой плотности измерений с шагом не более 200 м.

По результатам исследований можно констатировать, что для русел рек со сплаженным рельефом дна, соответствующих течению рек Аят и Тобол в границах Каратомарского водохранилища, зависимость погрешности измерений от шага галса имеет следующий характер:

$$\delta \approx 0.0092 \cdot L + 0.0455 \quad \delta \approx 0.0092 \cdot L + 0.0455 \quad (5)$$

где L – плотность измерений (шаг галса) поперек течения реки.

Заключение

В результате проведенного авторами статьи исследования получены следующие ответы на поставленные исследовательские вопросы.

Во-первых, корреляция параметров геоморфологии выбранного эталонного полигона с геоморфологией рек Тобол и Аят в зоне водохранилища позволяет констатировать возможность переноса полученных зависимостей на акватории этих рек.

Во-вторых, сравнительный анализ методов интерполяции Каратомарского водохранилища позволяет констатировать предпочтительность использования стохастических методов (метода простого крикинга) перед детерминированными методами (линейной интерполяции и регрессии) при увеличении частоты шага галсов гидродрона.

В-третьих, достижение требуемой точности батиметрических исследований с погрешностью менее 10% при современной геоморфологии дна Каратомарского и Верхнетобольского водохранилищ (как водных объектов равнинного типа с уклоном дна около 0,5-7,11 о/оо) возможно, если шаг галсов гидродрона не будет превышать 200 метров. Однако даже при соблюдении этого условия в ходе изучения акватории водохранилищ были получены участки со значительными отклонениями в рельефе, уточнение которых в 2025 г. потребовало проведения дополнительных полевых исследований.

Информация о финансировании

Данное исследование профинансировано Комитетом науки Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан ИРН проекта BR24992785 «Организация и проведе-

ние комплексных исследований по обеспечению устойчивого развития агропромышленного комплекса Костанайской области с созданием научно-исследовательского технологического центра».

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Cooley, S.W., Ryan, J.C., Smith, L.C. Human alteration of global surface water storage variability. *Nature*, 591 (7848), 78–81 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03262-3>.
- 2 Yao, F., Minear, J.T., Rajagopalan, B., Wang, C., Yang, K., Livneh, B. Estimating reservoir sedimentation rates and storage capacity losses using high-resolution Sentinel-2 satellite and water-level data. *Geophysical Research Letters*, 50 (16), e2023GL103524 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103524>.
- 3 Zhang, J., et al. Relationship between eutrophication and greenhouse gases emission in shallow freshwater lakes. *Science of the Total Environment*, 925, 171610 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171610>.
- 4 Johnson, M.S., et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126, e2021JG006305 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021JG006305>.
- 5 Kondolf, M., Yi, J. Dam renovation to prolong reservoir life and mitigate dam impacts. *Water*, 14 (9), 1464 (2022). <https://doi.org/10.3390/w14091464>.
- 6 Ge, S., Saar, M.O. Induced seismicity during geenergy development – A hydromechanical perspective. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2021JB023141 (2022). <https://doi.org/10.1029/2021JB023141>.
- 7 Liu, X., Olden, J.D., Wu, R., Ouyang, S., Wu, X. Dam construction impacts fish biodiversity in a subtropical river network, China. *Diversity*, 14 (6), 476 (2022). <https://doi.org/10.3390/d14060476>.
- 8 Chuke, M., Weiyang, Z., Zhipan, N., Pengzhi, L. Experimental modeling of three-dimensional (3D) partial dam-break flows: A review. *Water*, 17 (18), 2792 (2025). <https://doi.org/10.3390/w17182792>.
- 9 Suman, J., Lucy, A., Grantham, T.E., McKay, K.S., Duda, J., Howard, J. A decision-support framework for dam removal planning and its application in northern California. *Environmental Challenges*, 12, 100731 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100731>.
- 10 Chao, B., Wu, Y., Li, Y. Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level. *Science*, 320 (5873), 212–214 (2008). <https://doi.org/10.1126/science.1154580>.
- 11 Williamson, C.E., Saros, J.E., Vincent, W.F., Smol, J.P. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology & Oceanography*, 54 (6, part 2), 2273–2282 (2009). https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273.
- 12 On approval of the Concept for the development of the water resources management system of the Republic of Kazakhstan for 2024–2030. Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated February 5, 2024, No. 66. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000066> (accessed 27 March 2025).
- 13 Nurpeisova, M.B., Zharkimbaev, B.M. *Geodesy* (2002). (in Russian).
- 14 Neumann, J. Maximum depth and average depth of lakes. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 16 (6), 923–927 (1959). <https://doi.org/10.1139/f59-065>.
- 15 Anderson, D. A note on the morphology of the basins of the Great Lakes. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 18 (2), 273–277 (1961). <https://doi.org/10.1139/f61-019>.
- 16 Lehman, J.T. Reconstructing the rate of accumulation of lake sediment: The effect of sediment focusing. *Quaternary Research*, 5 (4), 541–550 (1975).
- 17 Carpenter, S.R. Lake geometry: Implications for production and sediment accretion rates. *Journal of Theoretical Biology*, 105 (2), 273–286 (1983). [https://doi.org/10.1016/S0022-5193\(83\)80008-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(83)80008-3).
- 18 Gao, H., Birkett, C., Lettenmaier, D. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resources Research*, 48 (9), W09504 (2012). <https://doi.org/10.1029/2012WR012063>.
- 19 Bandini, F., et al. Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22 (8), 4165–4181 (2018). <https://doi.org/10.5194/hess-22-4165-2018>.
- 20 Wang, Z., Xie, F., Ling, F., Du, Y. Monitoring surface water inundation of Poyang Lake and Dongting Lake in China using Sentinel-1 SAR images. *Remote Sensing*, 14 (14), 3473 (2022). <https://doi.org/10.3390/rs14143473>.
- 21 Hao, Z., Chen, F., Jia, X., Cai, X., Yang, C., Du, Y., Ling, F. GRDL: A new global reservoir area-storage-depth data set derived through deep learning-based bathymetry reconstruction. *Water Resources Research*, 60 (1) (2024). <https://doi.org/10.1029/2023WR035781>.

22 Yao, F., et al. Estimating reservoir sedimentation rates and storage capacity losses using high-resolution Sentinel-2 satellite and water-level data. *Geophysical Research Letters*, 50 (16) (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103524>.

23 Liu, K., et al. Remote sensing-based modeling of the bathymetry and water storage for channel-type reservoirs worldwide. *Water Resources Research*, 56 (11) (2020). <https://doi.org/10.1029/2020WR027147>.

24 Yun, H.-S., Cho, J.-M. Hydroacoustic application of bathymetry and geological survey for efficient reservoir management. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 29 (2011). <https://doi.org/10.7848/ksGPC.2011.29.2.209>.

25 Gonçalves, J., Bastos, M., Pinho, J., Granja, H. Digital aerial photography to monitor changes in coastal areas based on direct georeferencing. 5th EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone, Prague, Czech Republic (2011). URL: <https://www.researchgate.net/publication/360427485> (accessed 27 March 2025).

26 Tyszkowski, S., et al. Detection of coastal changes along rauk coasts of Gotland, Baltic Sea. *Remote Sensing*, 15, 1667 (2023). <https://doi.org/10.3390/rs15061667>.

27 Lubczonek, J., et al. Methodology for combining data acquired by unmanned surface and aerial vehicles to create digital bathymetric models in shallow and ultra-shallow waters. *Remote Sensing*, 14, 105 (2022). <https://doi.org/10.3390/rs14010105>.

28 Yigzaw, W., et al. A new global storage-area-depth data set for modeling reservoirs in land surface and earth system models. *Water Resources Research*, 54 (12), 386 (2018). <https://doi.org/10.1029/2017WR022040>.

29 Pirani, F., Modarres, R. Geostatistical and deterministic methods for rainfall interpolation in the Zayandeh. *Hydrological Sciences Journal*, 65 (16), 2678–2692 (2020). <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1833014>.

30 Weather in Rudny in July 2024. URL: <https://belkraj.by/pogoda/kazakhstan/11519843/rudnyy/july> (accessed 01 September 2024).

31 Tobol. Ministry of Natural Resources of Russia. State Water Register (2009).

¹Зарубин М.Ю.,

т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-1415-5244,
e-mail: zarubin_mu@mail.ru

^{1*}Зарубина В.Р.,

э.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-1376-9172,
*e-mail: zarubina_v@mail.ru,

²Ысқақ А.У.,

а.-ш.ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-8313-8982,
e-mail: yskak_aliya@ksu.edu.kz

²Ермолдина Г.Т.,

магистр, ORCID ID: 0000-0003-2143-7618,
e-mail: gulnazyermoldina@gmail.com.

¹М. Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті,
Қостанай қ., Қазақстан

²Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті,
Қостанай қ., Қазақстан

ГИДРОТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРЫЛЫСТАРДЫ КОМПЬЮТЕРЛІК ҮЛГІЛЕУДІҢ ДӘЛДІГІН БАҒАЛАУ МӘСЕЛЕСІ БОЙЫНША (СОЛТҮСТІК ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ҚАРАТОМАР ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ НЕТОБОЛ СУ ҚОЙМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ МЫСАЛЫНДА)

Аңдатпа

Соңғы жылдары Қазақстан су тапшылығымен де, қолданыстағы гидротехникалық құрылыстарды пайдаланумен де байланысты күрделі мәселелерге тап болды. Қуаңшылық кезеңдері тұщы су қорының жүйелі түрде азаюына әкелсе, 2024 жылғы су тасқыны бірқатар елді мекендерді су астында қалдырды. Гидротехникалық құрылыстардың шынайы жай-күйін, су қоймаларындағы су көлемін түсіну және ықтимал қауіп-қатерлерді болжау үшін үкімет бірқатар зерттеулер бастады. Гидротехникалық құрылыстардың жай-

күйі туралы нақты мәлімет алудың өзектілігіне байланысты, авторлар мақалада өңірдегі су қоймаларының (Қаратомар және Жоғарғы Тобыл су қоймалары мысалында) жай-күйін компьютерлік модельдеудің дәлдігін бағалау мәселелерін көтереді. Зерттеу барысында Қаратомар су қоймасының батиметриясы Apache 3 дронының көмегімен орындалды. Модельдеу дәлдігінің галстар жиілігіне тәуелділік заңдылықтарын зерттеу үшін кригинг әдістері қолданылды. Су қоймасының модельдері QGIS және Surfer бағдарламаларында құрылды. Жағалау сызығын талдау кезінде Sentinel-2 ғарыштық түсірілімдері мен «Қазсушар» РМК деректері пайдаланылды. Зерттеу нәтижесінде заманауи түбі геоморфологиясына арналған гидродрон галстарының тығыздығын (қадамын) анықтау алгоритмі әзірленді. Зерттеулер көрсеткендей, Қазақстанның тіпті жазық жердегі гидротехникалық құрылыстарын зерттеу дәлдігі далалық жұмыстарды жүргізу параметрлеріне айтарлықтай тәуелді, ал гидротехникалық құрылыстардың өзі пайдалану кезеңінде елеулі өзгерістерге ұшыраған.

Тірек сөздер: батиметрия, интерполяция, 3D-модельдеу, Қаратомар су қоймасы, Тобыл, Аят.

¹Zarubin M. Yu.,

Cand. Tech. Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-1415-5244,
e-mail: zarubin_mu@mail.ru

^{1*}Zarubina V.R.,

Cand. Econ. Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-1376-9172,
*e-mail: zarubina_v@mail.ru,

²Yskak A.U.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-8313-8982,
e-mail: yskak_aliya@ksu.edu.kz,

²Yermoldina G.T.,

Master, ORCID ID: 0000-0003-2143-7618,
e-mail: gulnazyermoldina@gmail.com.

¹Kostanay University of Engineering and Economics named after M. Dulatov,
Kostanay, Kazakhstan

²Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly,
Kostanay, Kazakhstan

**ON THE ISSUE OF ASSESSING THE ACCURACY
OF COMPUTER MODELING OF HYDRAULIC STRUCTURES
(USING THE EXAMPLE OF A STUDY OF THE KARATOMAR
AND VERKHNETOBOL RESERVOIRS IN NORTHERN KAZAKHSTAN)**

Abstract

In recent years, Kazakhstan has faced serious challenges, both in terms of water shortages and the operation of existing hydraulic structures. Droughts have systematically reduced accumulated freshwater reserves, while the 2024 flood has led to the inundation of several settlements. To understand the true state of existing hydraulic structures and the water reserves in these reservoirs, as well as to forecast potential risks, the government has initiated a series of studies. In light of the increased urgency of understanding the condition of hydraulic structures, the authors address the issue of assessing the accuracy of computer modeling of the region's reservoirs (using the Karatomar and Verkhne-Tobol reservoirs as examples). In this study, the bathymetry of the Karatomar reservoir was obtained using an Apache 3 drone. Kriging methods were used to study the relationship between modeling accuracy and line frequency. Reservoir models were built in QGIS and Surfer. Sentinel-2 satellite imagery and data from the Kazvodkhoz Agency (Kazvodkhoz) were used for shoreline analysis. The study resulted in an algorithm for determining the density (pitch) of hydrodrone lines for modern bottom geomorphology. The research showed that the accuracy of surveys of even lowland hydraulic structures in Kazakhstan significantly depends on the field survey parameters, and the hydraulic structures themselves have undergone significant changes over the course of their operation.

Keywords: Bathymetry, interpolation, 3D modeling, Karatomar Reservoir, Tobol River, Ayat River.

Received: October 3, 2025; accepted: February 14, 2026.