

---

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

---

DOI:10.25743/ICT.2024.29.3.003

# Методы и алгоритмы создания моделей рельефа и гидрологического моделирования для оценки влияния колебаний уровня воды на прибрежные объекты и территории

А. Е. ХМЕЛЬНОВ<sup>1,\*</sup>, А. С. ГАЧЕНКО<sup>1</sup>, Н. В. АБАСОВ<sup>2</sup>, Е. Н. ОСИПЧУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, 664033, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 664033, Иркутск, Россия

\*Контактный автор: Хмельнов Алексей Евгеньевич, e-mail: hmelnov@icc.ru

Поступила 11 декабря 2023 г., доработана 29 января 2024 г., принята в печать 05 февраля 2024 г.

Рассматриваются методы построения моделей подводного рельефа рек и водоемов и их совмещения с моделями наземного рельефа при неполных и неточных исходных данных, а также уточнения этих моделей на отдельных участках с использованием дополнительных данных. Получаемая в результате 3D-модель рельефа может быть использована для прогнозирования изменений береговой линии водных объектов, вызванных колебаниями уровня воды. Для рек рассматривается задача моделирования установившегося течения, решение которой необходимо для прогнозирования положения береговой линии в зависимости от расхода воды. С помощью предложенных методов разработана система моделей комплексного использования водных ресурсов р. Ангары и оз. Байкал.

**Ключевые слова:** цифровая модель рельефа, изолинии, триангуляция Делоне с ограничениями, морфинг карт, береговая линия, наводнения.

**Цитирование:** Хмельнов А.Е., Гаченко А.С., Абасов Н.В., Осипчук Е.Н. Методы и алгоритмы создания моделей рельефа и гидрологического моделирования для оценки влияния колебаний уровня воды на прибрежные объекты и территории. Вычислительные технологии. 2024; 29(3):25–37. DOI:10.25743/ICT.2024.29.3.003.

## Введение

Статья подготовлена по результатам ряда научных проектов, посвященных решению различных задач управления водными ресурсами и минимизации рисков от возможных ущербов, вызванных колебаниями уровня воды на реках, озерах и водохранилищах. Сложившаяся в настоящее время в России система управления режимами крупных ГЭС с водохранилищами не позволяет учитывать наблюдаемые за последние десятилетия глобальные изменения климата, включая сильные наводнения и засухи. Одним из таких примеров является длительное маловодье на оз. Байкал в 1996–2017 гг., особенно экстремальное в 2014–2017 гг., которое обострило проблемы поддержания допустимого уровня воды как в самом озере, так и в нижнем бьефе Иркутской ГЭС с риском нарушения работы водозаборов в Ангарске и Свирске, а также невыполнения требований судоходства на отдельных участках Братского водохранилища. В 2018 г. маловодный

период завершился, а в 2020 г. сменился на многоводный, что привело к затоплению ряда прибрежных территорий в нижнем и верхнем бьефах Иркутской ГЭС.

Для построения априорной (до получения дополнительной информации) модели рельефа помимо векторной топоосновы были использованы данные о подводном рельефе оз. Байкал, а также лоции р. Ангары и Иркутского водохранилища [1, 2]. Для представления моделей рельефа использовались триангуляционные сети (triangular irregular network – TIN) — одна из основных структур данных ГИС. В работе с триангуляциями применялась созданная в ИДСТУ СО РАН программная библиотека для построения и обработки триангуляций Делоне [3] и триангуляций Делоне с ограничениями, которая является быстрой, надежной и обрабатывает большие наборы данных [4, 5].

После сопоставления полученных по априорной модели рельефа примерных зон затопления с картами расположения населенных пунктов и других рассматриваемых в проекте искусственных и природных объектов были выбраны участки территории, нуждающиеся в уточнении модели рельефа. Для этих участков приобретены архивные данные воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и выполнена аэрофотосъемка (АФС). Далее разработана технология включения уточняющих данных в априорную модель рельефа.

На озерах и водохранилищах полученная уточненная модель рельефа может использоваться непосредственно для определения зон затопления или осушения при различных уровнях воды. Для рек эта задача значительно более сложная: чтобы предсказать положение береговой линии при некотором расходе воды, требуется выполнить моделирование установившегося течения на полученной модели рельефа. При этом необходимо подобрать дополнительные параметры поверхности (шероховатость) таким образом, чтобы предсказания модели соответствовали наблюдениям, например положениям береговой линии по данным дистанционного зондирования (спутниковым и другим снимкам) при известных на момент съемки расходах воды.

На основе полученных данных строятся математические модели по различным сценариям водности для научно-практического анализа исследуемых территорий. В работе рассмотрены и построены модели рельефов на ключевых участках Байкальской природной территории (БПТ) — р. Ангаре, Иркутском и Братском водохранилищах. Разработана система моделей комплексного использования водных ресурсов р. Ангары и оз. Байкал.

## 1. Построение совмещенных моделей рельефа

Существует большой выбор источников информации о наземном рельефе: глобальные растровые цифровые модели рельефа (ЦМР) с разрешением 1"/пиксель (SRTM, Copernicus DEM), векторные топографические карты, более точные платные растровые ЦМР и т. д. При этом информация о подводном рельефе очень скучная: в лучшем случае для больших пространств судоходных участков рек, озер и водохранилищ получится воспользоваться специальными навигационными картами (лоциями), представленными в бумажной форме. Несмотря на то что лоции очень схематичные и чаще всего изданы несколько десятилетий назад, более точных данных о подводном рельефе по всей акватории найти не удалось.

Так, для построения модели подводного рельефа р. Ангары в нижнем бьефе Иркутской ГЭС была использована информация атласа “Карта реки Ангара от Иркутской ГЭС до 142 км” [1], для чего выполнены векторизация и обработка его слоев: изолиний

глубин, отметок глубин и контуров береговых линий (включая острова). С целью получения модели подводного рельефа применялся алгоритм построения триангуляции с ограничениями, позволяющий выполнить кусочно-линейную интерполяцию глубин точек и изобат. Далее проведено совмещение береговых линий атласа с топографическими картами посредством поворота и сдвига, которое показало большую погрешность при таком подходе.

Для более точного моделирования уровня воды и совмещения надводного рельефа с подводным разработан оригинальный метод [5] построения цифровой модели рельефа с использованием технологии морфинга (трансформации) электронных карт (рис. 1). При этом выполняется непрерывное преобразование плоскости, которое может совместить неточные контуры береговых линий (например, лоцманских карт) с более точными (например, спутниковых снимков). Преобразование применяется к различным слоям карты подводного рельефа (изобатам и отметкам глубин). Полученные в результате морфинга модели рельефа хорошо отображают существующее положение вещей.

Для создания 3D-моделей рельефа разработан оригинальный алгоритм построения триангуляции Делоне [3] с ограничениями по слоям карты. Для каждого слоя указывается его роль при построении триангуляции. Слой может содержать сведения: о наземном рельефе, отметках уреза воды, контурах береговых линий рек и озер, подводном рельефе. При работе с подводным рельефом и береговыми линиями водных объектов необходима информация об отметках уреза воды. По этим данным строится вспомогательная триангуляция, задающая поверхность уровня воды, из которой далее извлекаются данные об отметках высот, относительно которых отсчитываются глубины точек, также из этой триангуляции берутся высоты точек береговых линий рек и озер (для озер из высот точек контура берется минимальная).

В результате применения разработанной технологии [4] построены совмещенные модели рельефа Иркутского водохранилища [2], р. Ангары в нижнем бьефе Иркутской ГЭС, а также отдельных участков Братского водохранилища. Также построена совмещенная модель рельефа оз. Байкал, но при этом использовалась не лоция, а растровая

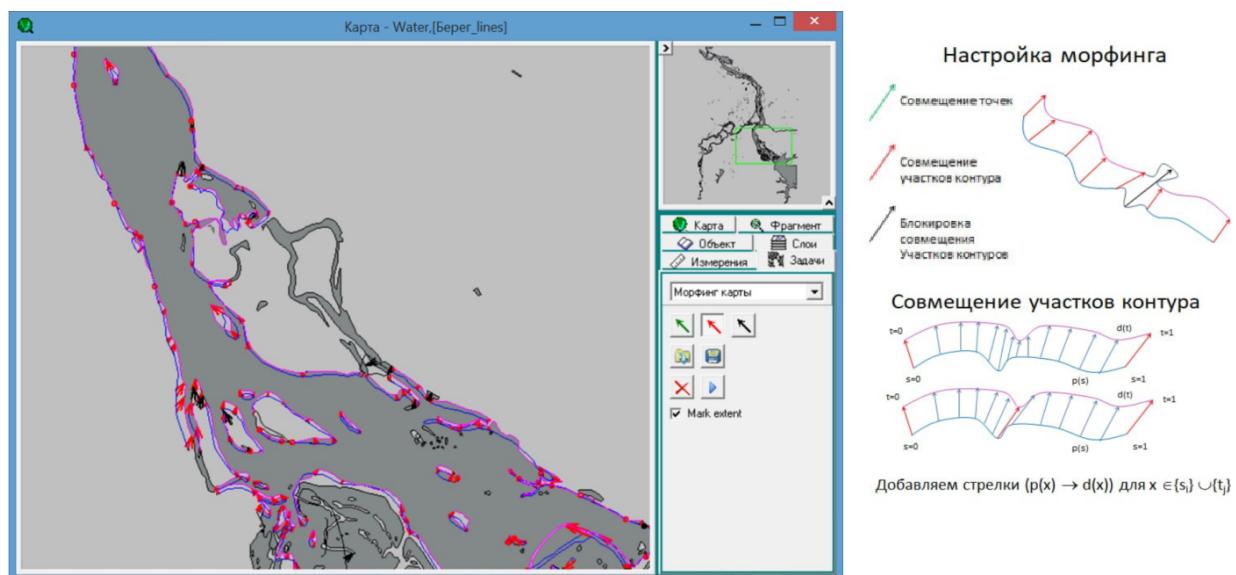


Рис. 1. Настройка морфинга карт

Fig. 1. Setting up map morphing

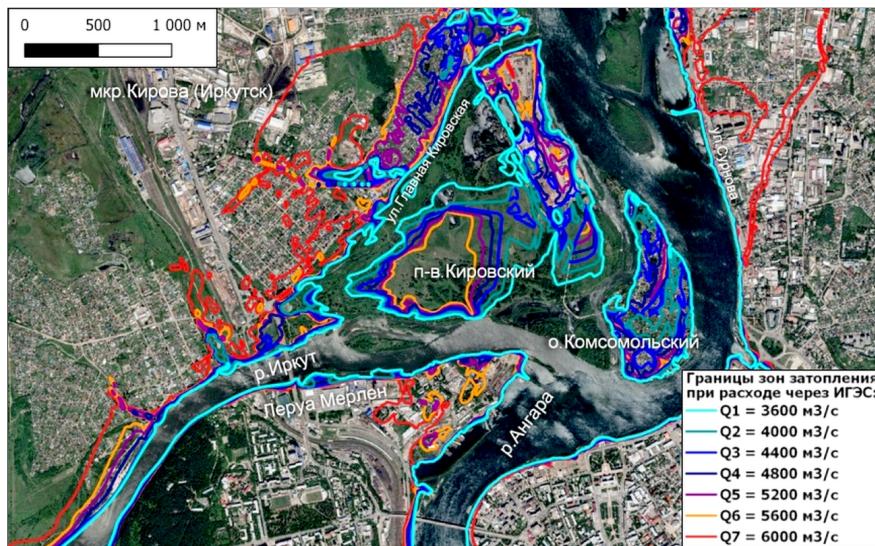


Рис. 2. Карта уровней затопления г. Иркутска при различных сценариях водности  
Fig. 2. Map of flood levels in Irkutsk under various water content scenarios

модель подводного рельефа озера с разрешением 180 м/пиксель. Полученные совмещенные модели рельефа принимались как априорные для дальнейшего уточнения. Уточненные модели рельефа были использованы для решения таких задач, как получение границ зон затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС при различных попусках ГЭС (рис. 2) и анализ объектов водоснабжения Братского водохранилища на предмет их работоспособности при различных уровнях водности. Для уточнения данных о наземном рельефе применялись данные ВЛС и АФС, а для уточнения подводного рельефа при анализе объектов водоснабжения — промеры глубин.

## 2. Цифровая модель рельефа побережья оз. Байкал и р. Ангары

Цели работы — определение научно обоснованных требований к регулированию уровня оз. Байкал и эколого-экономическая оценка последствий регулирования для Байкала и сопряженных территорий. Результатами их выполнения являются оценка влияния изменения уровня озера на экосистему его мелководной зоны и прибрежных территорий и обоснование экологической, социально-экономической оценки последствий (ущербов) при изменении уровня Байкала и регулировании расходов Иркутской ГЭС.

Для определения влияния изменения уровня оз. Байкал на экосистему его мелководной зоны и прибрежных территорий необходимо иметь качественные цифровые модели рельефа на участках, подверженных потенциальным ущербам при регулировании уровня озера.

В рамках работ определены населенные пункты и их границы (рис. 3), которые могут быть подвержены затоплению (речь идет об оз. Байкал в границах Иркутской области, Иркутском водохранилище и нижнем бьефе Иркутской ГЭС). Разработаны обзорные карты (схемы) исследуемого объекта с нанесением основных территорий (зон), включая расположенные на них населенные пункты/объекты, подверженные рискам колебания уровня Байкала в диапазоне подъема воды до 460 м в Тихоокеанской системе высот (ТО). Заметим, что действующим постановлением Правительства РФ от 26.03.2001 г. № 234 “О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осу-

ществлении хозяйственной и иной деятельности” допустимые значения уровня воды в озере ограничены диапазоном 456.00–457.00 м ТО. Таким образом, уровень 460 м ТО означает подъем воды на 3 м сверх этого максимума. В результате анализа территории получен перечень объектов, попадающих в зоны риска (рис. 3).

Для обеспечения проекта дополнительными данными и уточнения рельефа прибрежной территории на ключевых участках проведена цифровая аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Для аэрофотосъемки использовались квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro и беспилотный комплекс самолетного типа Геоскан 101. Съемка проводилась с высоты 100, 153 и 220 м. Получаемые в результате съемки изображения (рис. 4) позволяют создавать при помощи специализированного лицензионного программного обеспечения (Agisoft Metashape Professional) ортофотопланы и 3D-модели рельефа (цифровые модели местности) с точностью выше 10 см/пиксель, что приблизительно соответствует масштабу топографического плана М 1:1000. При проведении АФС обеспечивалось продольное и поперечное перекрытие снимков около 70 % для качественного построения 3D-модели (каждый полет производился отрезками по длине и ширине участка). В результате обработки аэрофотоснимков в Agisoft Metashape Professional получены цифровые модели местности и ортофотопланы (рис. 4). Для уточнения моделей рельефа были использованы результаты лазарной съемки — воздушно-лазерного сканирования с самолета — и результаты цифровой фотосъемки с БПЛА. Опишем способы обработки этих данных.

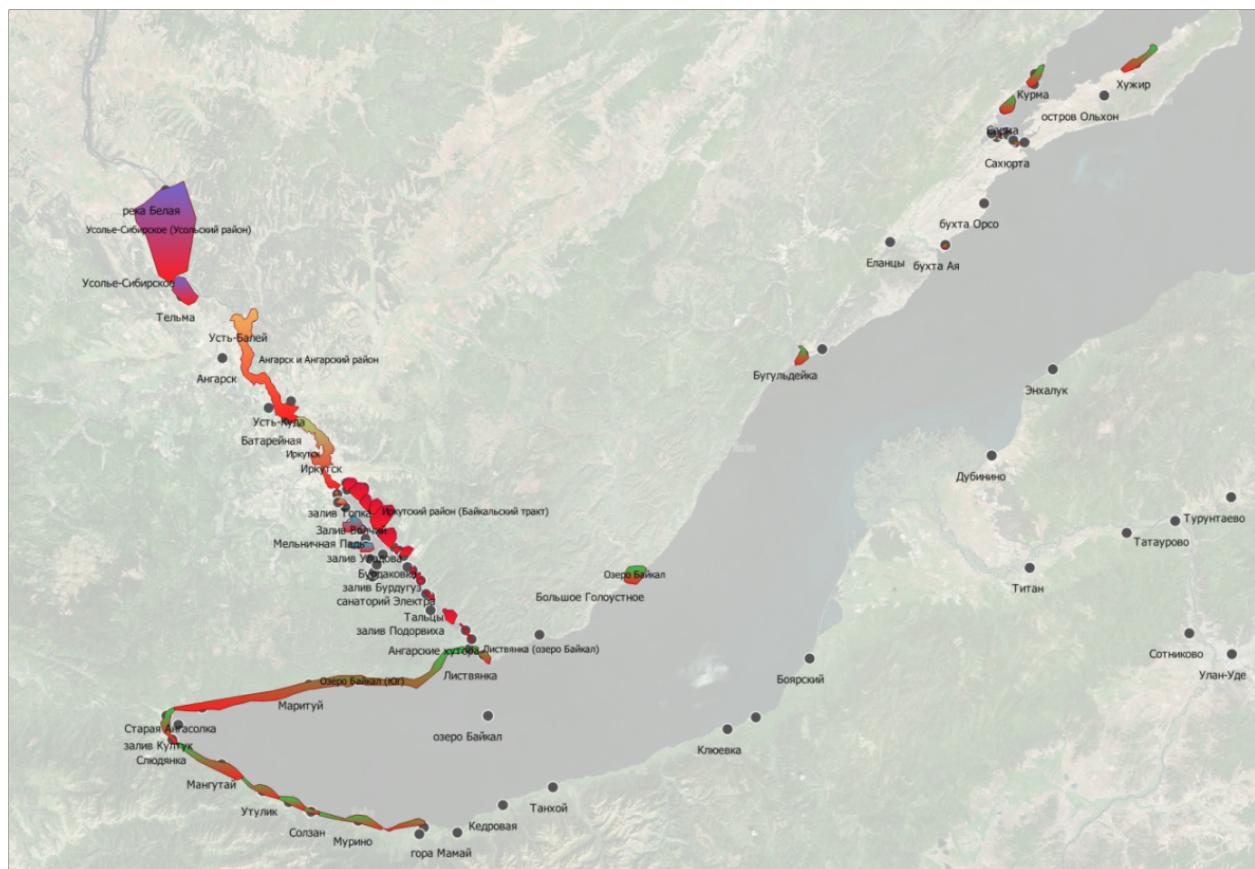


Рис. 3. Схема исследуемой территории  
Fig. 3. The sketch map of the area under consideration



Рис. 4. Ортофотоплан местности (фрагмент Иркутского водохранилища). Съемка с БПЛА на высоте 220 м

Fig. 4. Orthomosaic of the area (fragment of the Irkutsk reservoir). Aerial shot from an UAV at the altitude 220 m

Результаты ВЛС в значительной части можно использовать как ЦМР, поскольку они позволяют оставлять лишь самые последние отклики от каждого лазерного импульса (приходящие от земной поверхности), игнорируя отклики от таких объектов, как провода и ветви деревьев. При этом в облаке точек остаются отклики от домов, которые в передаваемых данных в основном были отфильтрованы с использованием соответствующих макросов программы обработки лазарных данных. Исключение могут составлять здания большой площади (например, торговые центры), размеры которых превышают заданные в фильтре значения.

В ходе фотограмметрической обработки съемки с БПЛА получена растровая модель рельефа, которая может быть непосредственно использована для дальнейшей обработки. Кроме того, в ходе обработки создается плотное облако точек, которое также может быть использовано для получения ЦМР. Само плотное облако содержит чрезмерно большое количество точек (сотни миллионов точек на небольшой участок). В Agisoft Metashape реализовано прореживание плотного облака точек с заданным шагом, что позволяет получить более подходящее их количество для дальнейшей обработки. Так, после прореживания с шагом 0.8 м (в 10 раз больше исходного среднего расстояния между точками) остается несколько миллионов точек. По этим точкам уже можно построить триангуляцию, однако она будет описывать цифровую модель местности. В Agisoft Metashape реализована классификация точек рельефа по углу наклона треугольников. После применения этого алгоритма фильтрации с параметрами по умолчанию ( $15^\circ$  наклона) остаются в основном точки рельефа. В результате также получаем облако точек с плотностью, близкой к данным ВЛС.

Облака точек для уточняемых участков могут содержать большие их количества (несколько миллионов точек, есть участок с 37 млн). Непосредственное включение таких данных в априорную модель рельефа, которая, например, для оз. Байкал содержит около 5.5 млн точек, значительно увеличит ее объем и сделает неудобным практическое использование. Кроме того, детализация такой модели рельефа будет чрезмерной для рассматриваемой задачи.

Поэтому предложен алгоритм обработки таких облаков точек, позволяющий уточнить фрагменты модели рельефа по результатам съемки с желаемой точностью: построение триангуляции по всем точкам облака; ее растеризация; сглаживание раstra гауссовым фильтром; снижение разрешения до 1 м/пиксель; построение по раstrу более низкого разрешения упрощенной триангуляции с фильтрацией точек; замена фрагмента априорной модели на уточненный из этой триангуляции. В результате таких замен получаем модель рельефа, уточненную на ключевых участках, изолинии которой позволяют лучше определить зоны затопления и попадающие в них объекты (рис. 5).

Для дальнейшего использования полученных моделей рельефа требуется определять площади водных объектов и зоны затопления при различных уровнях воды. Для решения этой задачи недостаточно просто построить линейные изолинии рельефа, поэтому разработан алгоритм построения площадных горизонтальных сечений триангуляционной ЦМР. При работе алгоритма построения площадных сечений поддерживаются два режима замыканий: вокруг минимумов и вокруг максимумов. Для получения зон затопления необходимо использовать замыкание вокруг минимумов. Пересечение объектов, описывающих исследуемые участки, с объектами, описывающими водную поверхность при различных уровнях воды, позволяет строить таблицы изменения площади водной поверхности на этих участках в зависимости от уровня воды, которые требуются для анализа последствий колебания уровня.

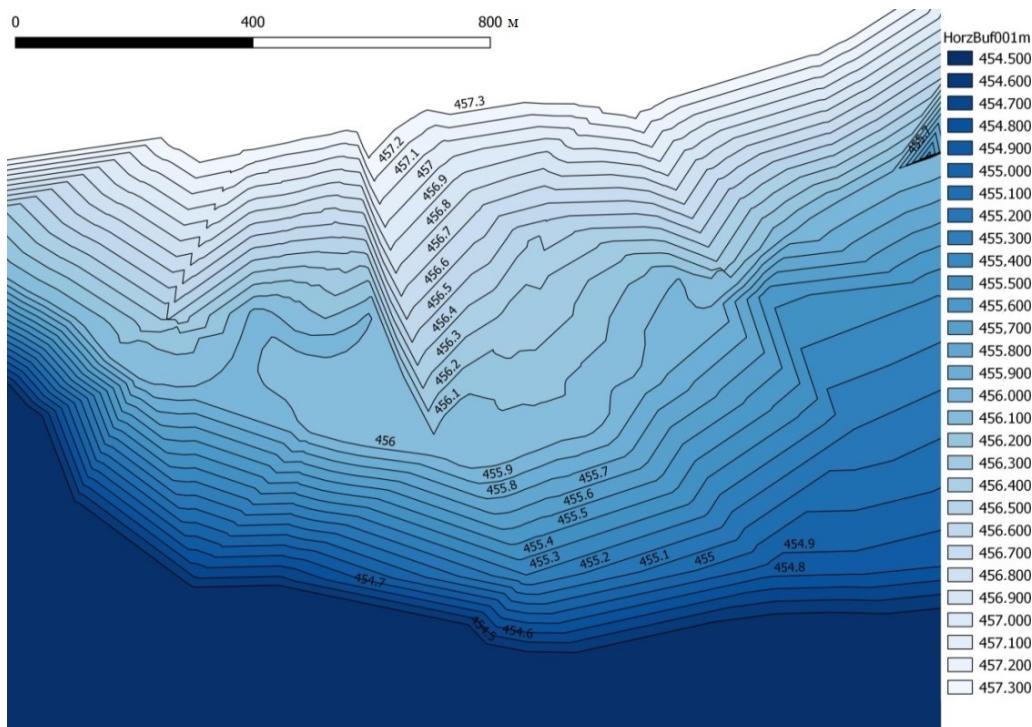


Рис. 5. Площадные объекты, описывающие водную поверхность при различных уровнях воды  
Fig. 5. Polygonal features describing the water surface at different water levels

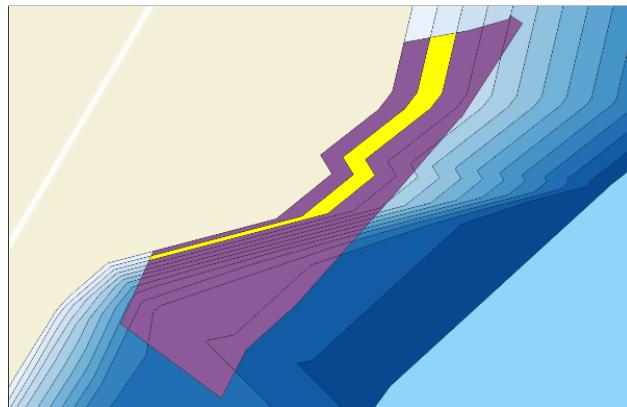


Рис. 6. Пересечение площадного объекта с приращениями зон затопления (один из полученных участков выделен)

Fig. 6. Intersection of a polygonal feature with the increments of flood zones (one of the resulting features is highlighted)

Дополнительно реализован алгоритм построения приращений площадей — разностей между зоной затопления текущего уровня и зоной затопления предыдущего (более низкого) уровня. С использованием таких слоев карт удобно находить приращения затопленной части отдельных площадных или линейных объектов при изменении уровня воды. Таким методом были вычислены ущербы от затопления различных видов линейных и площадных объектов на территориях Иркутской области, примыкающих к Байкалу и Иркутскому водохранилищу.

Если для озер и водохранилищ уровень воды описывается одним числом, то для рек его необходимо вычислить в каждой точке в зависимости от расхода воды и ряда других параметров. Для выполнения этих расчетов требуются профили рельефа вдоль морфостворов — линий, перпендикулярных направлению течения реки. Для нахождения профилей реализован алгоритм, получающий на вход полилинии, вдоль которых требуется найти высоту рельефа, и дающий на выходе таблицы изменения высоты в зависимости от расстояния от начала полилиний. Далее эта информация используется при разработке гидрологических моделей.

По результатам гидрологического моделирования каждому морфоствору сопоставляется уровень воды в этом месте при заданном расходе воды. Далее для получения контура зоны затопления создается триангуляция, описывающая поверхность уровня воды, которая затем вычитается из триангуляции, описывающей ЦМР. Контур зоны затопления — это изолиния на уровне нуля у разности этих триангуляций (рис. 6).

### **3. Система моделей комплексного использования водных ресурсов оз. Байкал и р. Ангара**

Для исследования эффективности использования водных ресурсов в бассейнах оз. Байкал и р. Ангара разработана и развивается оригинальная система согласованных моделей [6, 7], содержащая современные данные об изменении притока, рельефе местности, а также экологические и водохозяйственные требования, особенности законодательства. Она включает различные модели, реализованные в виде автономных программных компонентов, выполняющих определенный набор функций, принимающих входные данные и параметры и передающих результаты другим компонентам (рис. 7).



Рис. 7. Система моделей комплексного исследования режимов ГЭС

Fig. 7. System of models for comprehensive study of regimes for hydroelectric power station

Система включает в себя как модели управления режимами ГЭС, так и модели уточнения уровней воды в водохранилищах и на незарегулированных участках реки, что важно для неэнергетических участников комплекса (водного транспорта, водоснабжения, рыбного хозяйства и др.). Также в систему включены алгоритмы анализа и обработки данных глобальных климатических моделей, позволяющие формировать долгосрочные прогнозы притока воды с использованием современных систем прогнозирования климата [6, 7].

Блок моделирования режимов ГЭС позволяет оценить возможные режимы работы ГЭС, наполнения и сработка водохранилищ с учетом множества энергетических, экологических и водохозяйственных ограничений. Режимы работы ГЭС определяются через двухступенчатую оптимизацию — наполнение в летне-осенний период и сработка в осенне-зимний период. В данный блок включены:

- имитационные модели, позволяющие проводить моделирование режимов ГЭС по заданным правилам с использованием данных о прогнозах притоков воды, различных параметров управления и ограничений, включая диспетчерские графики, определяющие зависимость расходов ГЭС от текущего уровня воды в водохранилище;
- оптимизационные модели, рассматривающие различные варианты оптимального управления режимами ГЭС и каскадов по заданному критерию оптимизации (минимизации отклонения уровня оз. Байкал от естественного режима, минимизация холостых сбросов, максимизация выработки электроэнергии каскада и др.);
- стохастические модели, позволяющие исследовать различные формы прогнозируемого стока и другие вероятностные факторы с учетом распределения внутри заданного диапазона за счет генерации множества детерминированных моделей.

При наличии противоречивых критерииев используются специальные модели много-критериальной оптимизации, позволяющие формировать области Парето-оптимальных решений с возможностью нахождения компромиссных решений. Для режимов Ангарского каскада ГЭС можно выделить следующие приоритеты ограничений:

- 1) *технические* — требования по условиям безопасной работы гидротехнических сооружений (допустимые расходы через ГЭС, максимальные уровни воды в верхнем и нижнем бьефах, напоры, режимы гидротурбин и др.);
- 2) *экологические* — ограничения уровенного режима оз. Байкал и водохранилищ по условиям выполнения экологических требований;
- 3) *социально-экономические*, связанные с затоплением в верхнем и нижнем бьефах при высокой водности, нормальным функционированием водозаборов при низкой водности, ледовыми ограничениями в зимний период;
- 4) *навигационные*, определенные условиями судоходства;
- 5) *энергетические*, связанные с энергетической эффективностью функционирования отдельных ГЭС и каскада в целом.

Для моделирования режимов ГЭС используется статистика по притоку в декадном разрешении с 1900 г. Для уточнения рисков мало- и многоводных периодов режимы ГЭС рассматриваются как на непрерывном ряде притока (более 120-летний период), так и по отдельным гидрологическим годам с генерацией притока заданной обеспеченности. По выбранному сценарию проводятся расчеты режимов ГЭС исходя из заданной обеспеченности естественного притока в каждое водохранилище (от 99.99 до 0.01 % обеспеченности). Сток в створе конкретной ГЭС определялся через уравнение водного баланса по годам-аналогам с введением дополнительных поправочных коэффициентов, согласованием стока с другими створами, поиском аналогов по климатическим показателям.

Для уточнения минимальных отметок водозаборов и расчета зон затоплений используется модель установившегося течения р. Ангара в виде задания большого числа базовых морфостворов, находящихся на заданном расстоянии друг от друга и отражающих основные разветвления и соединения рукавов реки. На основе заданных морфостворов формируются контуры их поперечных сечений в виде зависимости высоты от расстояния до крайней точки левого берега морфоствора. Расчет геометрических характеристик каждого морфоствора производится по формуле Шези [6]

$$V = C\sqrt{RI},$$

где  $V$  — средняя скорость потока воды;  $C$  — коэффициент Шези;  $R$  — гидравлический радиус;  $I$  — наклон водной поверхности. В процессе расчета определяются промежуточные параметры: расход воды, площадь сечения, смоченный периметр, глубина, ширина, длина, площадь и шероховатость участка сечения. Методом итераций для малого изменения уровня реки по установленным расходам через Иркутскую ГЭС (от 1300 до 6000 м<sup>3</sup>/с) проведены расчеты показателей с задаваемой ошибкой.

Для каждого заданного расхода через ГЭС выполняется расчет морфометрических характеристик всех заданных морфостворов, уровень воды которых определяется на основе средней скорости потока. После итерационных процедур уточнения уровня в каждом морфостворе устанавливается структура их характеристик. На их основе определяются параметры промежуточных морфостворов с равномерным по длине изменением уровня водной поверхности и проверкой гидравлических показателей.

При высоких расходах воды для повышения точности моделирования течения требуется уточнение рельефа и шероховатости прибрежных частей. Незначительные изменения русла оказывают меньшее влияние на точность вычислений. При экстремально низкой водности для точности моделирования большое значение имеет подводный рельеф, небольшие преобразования которого могут существенно изменить течение около водозаборов, создавая риски их оголения.

## Заключение

Практика эксплуатации крупных ГЭС показывает, что при планировании их долгосрочных режимов недостаточно ориентироваться только на среднемноголетние показатели, необходимы постоянный мониторинг и учет изменений стока, подводного и надводного рельефов, экологических, водохозяйственных и других ограничений. Комплексные исследования долгосрочных режимов ГЭС с учетом возможных климатических изменений позволят снизить риски чрезвычайных ситуаций, особенно в условиях экстремальной водности.

Разработанная система моделей эффективно использовалась при исследовании многолетних режимов Иркутской ГЭС и оз. Байкал, на ее основе была отработана технология создания диспетчерских графиков и правил регулирования с приоритетом на выполнение заданных ограничений.

Представленные комплекс работ и алгоритмы по созданию прибрежных согласованных рельефов необходимы для оценки последствий и минимизации рисков экстремального стока на реках, озерах и водохранилищах. Разработанные технологии могут быть использованы на любых других опорных территориях и помогать исследователям в решении подобных задач.

**Благодарности.** Работа поддержана в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту “Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объемов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно- управляемого подхода и машинного обучения” (номер гос. регистрации 121030500071-2).

## Список литературы

- [1] Карта реки Ангара (лоция). Иркутск: Изд-во Министерства речного флота, Главводпуть; 1974: 48.
- [2] Карта Иркутского водохранилища. Иркутск: Изд-во Министерства речного флота РСФСР, Главводпуть; 1989.
- [3] Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Томского государственного университета; 2002: 128.
- [4] Gachenko A.S., Hmelnov A.E., Hmelnova T.F., Rughnikov G.M. The use of triangulation processing algorithms for the construction of combined model of the underwater and above-water terrain of the bed of the Bratsk Reservoir. Proc. 1st Intern. Geographical Conf. of North Asian Countries on China – Mongolia – Russia Economic Corridor. Geographical and Environmental Factors and Territorial Development Opportunities. 2018; 190(1):96–107. DOI:10.1088/1755-1315/190/1/012028.

- [5] **Вычков И.В., Гаченко А.С., Ружников Г.М., Хмельнов А.Е.** 3-D моделирование русла реки Ангара. Труды международной конференции “Математические и информационные технологии”. Иркутск; 2016: 26–32.
- [6] **Abasov N.V., Nikitin V.M., Berezhnykh T.V., Osipchuk E.N.** Monitoring and predictive estimations of atmospheric parameters in the catchment area of lake Baikal. *Atmosphere*. 2022; 13(1):49. DOI:10.3390/atmos13010049.
- [7] **Rai A., Saha S.K.** Evaluation of energy fluxes in the NCEP climate forecast system version 2.0 (CFSv2). *Climate Dynamics*. 2018; (50):101–114. DOI:10.1007/s00382-017-3587-z.

---

## MATHEMATICAL MODELLING

---

DOI:10.25743/ICT.2024.29.3.003

### Methods and algorithms for creating relief models of hydrological modelling for assessing the impact of water level fluctuations on coastal objects and territories

A. E. HMELNOV<sup>1,\*</sup>, A. S. GACHENKO<sup>1</sup>, N. V. ABASOV<sup>2</sup>, E. N. OSIPCHUK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, 664033, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, 664033, Irkutsk, Russia

\*Corresponding author: Alexey E. Hmelnov, e-mail: hmelnov@icc.ru

Received December 11, 2023, revised January 29, 2024, accepted February 05, 2024.

#### Abstract

The article addresses the experience gained while processing data on the topography of water bodies, such as the Irkutsk reservoirs and the Angara River and Lake Baikal, in order to obtain a model that combines data from various sources, such as topographic and pilot maps, results of depth measurements with an echo sounder, contours of coastlines obtained from remote sensing data and aerial photography. The authors have considered algorithms developed for processing such data, which are based on the construction of triangulations. In addition to the actual algorithm for constructing the Delaunay triangulation with restrictions on vector data of various origins, the following algorithms have been implemented: removal of triangulation artifacts built on the contours of the topography and morphing of maps to match the underwater and surface parts of the topography, replacement of the triangulation fragment. The resulting model contains all the information on the topography of the examined area and allows using it for further hydrological calculations and analysis of the studied reservoirs sectors.

**Keywords:** digital elevation model, isolines, constrained Delaunay triangulation, map morphing, coastline, floods.

**Citation:** Hmelnov A.E., Gachenko A.S., Abasov N.V., Osipchuk E.N. Methods and algorithms for creating relief models of hydrological modelling for assessing the impact of water level fluctuations on coastal objects and territories. *Computational Technologies*. 2024; 29(3):25–37. DOI:10.25743/ICT.2024.29.3.003. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The results were obtained within the framework of the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the project “Methods and technologies of cloud-based service-oriented platform for collecting, storing and processing large volumes of multi-format interdisciplinary data and knowledge based upon the use of artificial intelligence, model-guided approach and machine learning” (state registration number 121030500071-2).

### References

1. Karta reki Angara (lotsiya) [Map of the Angara River (pilot chart)]. Irkutsk: Izdatel'stvo Ministerstva Rechnogo Flota, Glavvodput; 1974: 48. (In Russ.)
2. Karta Irkutskogo vodokhranilishcha [Map of the Irkutsk Reservoir]. Irkutsk: Izdatel'stvo Ministerstva Rechnogo Flota, Glavvodput; 1989. (In Russ.)
3. **Skvortsov A.V.** Triangulyatsiya Delone i ee primenenie [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Universiteta; 2002; 128. (In Russ.)
4. **Gachenko A.S., Hmelnov A.E., Hmelnova T.F., Rughnikov G.M.** The use of triangulation processing algorithms for the construction of combined model of the underwater and above-water terrain of the bed of the Bratsk Reservoir. Proc. 1st Intern. Geographical Conf. of North Asian Countries on China–Mongolia–Russia Economic Corridor. Geographical and Environmental Factors and Territorial Development Opportunities. 2018; 190(1):96–107. DOI:10.1088/1755-1315/190/1/012028.
5. **Bychkov I.V., Gachenko A.S., Rughnikov G.M., Hmelnov A.E.** 3-D modelirovaniye rusla reki Angara [3-D modelling of the Angara river bed]. Trudy Mezhdunarodnoy Konferentsii "Matematicheskie i Informatzionnye Tekhnologii". Irkutsk; 2016: 26–32. (In Russ.)
6. **Abasov N.V., Nikitin V.M., Berezhnykh T.V., Osipchuk E.N.** Monitoring and predictive estimations of atmospheric parameters in the catchment area of lake Baikal. Atmosphere. 2022; 13(1):49. DOI:10.3390/atmos13010049.
7. **Rai A., Saha S.K.** Evaluation of energy fluxes in the NCEP climate forecast system version 2.0 (CFSv2). Climate Dynamics. 2018; (50):101–114. DOI:10.1007/s00382-017-3587-z.