

## Источники информации о подводном, прибрежном и наземном рельефе и их применение для построения совмещенных моделей рельефа

А. Е. Хмельнов, А. С. Гаченко\*

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, 664033, Иркутск, Россия

\*Контактный автор: Гаченко Андрей Сергеевич, e-mail: gachenko@icss.ru

Поступила 08 июня 2022 г., принята в печать 30 июня 2022 г.

Представлен опыт обработки данных о рельефе водных объектов, таких как Иркутское и Братское водохранилища, с целью создания комбинированной модели рельефа, объединяющей данные из различных источников (топографических и лоцманских карт, результатов промеров глубин эхолотом, контуров береговых линий, полученных по данным дистанционного зондирования Земли). Рассмотрено использование алгоритмов для обработки данных, основанных на построении триангуляций. Помимо собственно алгоритма построения триангуляции Делоне с ограничениями по векторным данным различной природы реализованы алгоритмы удаления артефактов триангуляции, построенной по изолиниям рельефа и морфинга карт, для согласования подводной части рельефа с надводной, замены фрагмента триангуляции. Модель рельефа содержит всю информацию о рельефе исследуемого района, что позволяет использовать ее для дальнейших гидрологических расчетов и анализа участков водоемов.

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

*Цитирование:* Хмельнов А.Е., Гаченко А.С. Источники информации о подводном, прибрежном и наземном рельефе и их применение для построения совмещенных моделей рельефа. Вычислительные технологии. 2022; 27(5):55–68. DOI:10.25743/ICT.2022.27.5.006.

### Введение

Для задач, учитывающих изменение уровня воды, будь то затопление или обмеление, необходимо иметь комбинированную модель, объединяющую различную информацию о подводном и наземном рельефе. Для такого рода моделей существует специальный термин “топобатиметрия”. Наиболее важная часть модели, которая должна быть максимально точной, — это ее прибрежные участки в диапазоне возможных изменений уровня воды, для анализа последствий которых модель и создается. Наиболее сложной задачей, возникающей при построении таких моделей, является получение информации о подводном рельефе.

При реализации проекта по моделированию зон затопления р. Ангары проведен анализ имеющихся сведений о батиметрии и получен вывод, что среди них лоцманские карты являются наиболее полными источниками информации. Поскольку карты очень

схематичны, был разработан метод их преобразования, позволяющий комбинировать менее точные схематические данные с более точными топографическими картами [1]. Дальнейшее сравнение полученных таким образом данных с результатами промеров глубин с помощью эхолота на некоторых участках Братского водохранилища показало, что фактические замеры могут существенно отличаться от исходных данных, полученных по лоцманским картам [2]. Таким образом, для уточнения модели подводного рельефа требуется найти дополнительные источники информации о глубинах. Измерение глубин с помощью эхолота — трудоемкая и дорогостоящая задача, поэтому обработать таким образом всю акваторию большого водоема не получится. Многолучевые эхолоты [3] позволяют охватить гораздо более широкие участки дна под судном, но такие устройства не могут эффективно работать в районах мелководья, которые мы здесь рассматриваем.

Другой перспективной технологией является применение топоватиметрических лидаров [4, 5], что позволяет строить модель подводного рельефа [6]. Топоватиметрический лидар для измерения положения водной поверхности использует инфракрасные лазерные лучи, не проникающие в воду, и зеленые лазерные лучи, проходящие через воду, что позволяет измерять расстояние до дна на полутора–трех глубинах Секки. Серьезные устройства такого рода требуют использования самолета, а их цены (которые всегда доступны только по запросу) непомерно высоки. По крайней мере, представители Leica Geosystems в России даже не пытаются продавать подобные устройства, и нам пока не удалось найти ни одной компании, которая могла бы выполнять такие полевые работы.

Спутниковое дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) дает возможность получить максимально большой охват наблюдаемой территории. Ряд методов обработки данных ДЗЗ позволяет определять глубины: использование стереоскопических космических снимков высокой точности, обработка спутниковых радиолокационных изображений различных типов, инверсия батиметрии по данным о цветности воды, восстановление батиметрии по характеристикам волнения на воде. Большинство этих методов требует использования таких данных дистанционного зондирования, которые невозможно получить бесплатно. Среди рассмотренных здесь методов наибольший интерес для нас представляют методы получения подводного рельефа из [7, 8], так как они могут использовать свободно распространяемые спутниковые данные.

Спутниковые космические снимки широко применяются для отслеживания изменений береговых линий. Например, в [11] изображения оз. Севан со спутника Landsat использовались для долгосрочного (между 1973 и 2015 гг.) отслеживания изменений береговой линии озера. В обзоре [11] упоминается несколько других исследований по обнаружению водных объектов на снимках, в частности работа [12]. Авторы проделали титанический труд по отслеживанию изменений в поверхностных водах всего земного шара за 32 года с разрешением 30 м/пиксель на основе трех миллионов спутниковых изображений Landsat. Использована специально разработанная экспертная система для классификации пикселей. Для оценки изменений уже представленных векторными контурами береговых линий Геологическая служба США (USGS) разработала специальный инструмент DSAS [13], являющийся расширением ArcGIS.

Таким образом, из всего разнообразия методов обработки данных ДЗЗ нам удалось воспользоваться методами обнаружения береговых линий, которые получилось усовершенствовать до субпиксельной точности.

## 1. Модели и методы

Рассмотрим алгоритмы и данные, которые использовались для создания комбинированных моделей рельефа участков Братского водохранилища. Источниками информации служили изолинии рельефа с векторной топоосновой масштабов 1:25 000 и 1:50 000, отметки глубин и изобаты, оцифрованные с лоцманских карт водохранилища [6], промеры глубин, сделанные во время экспедиции с помощью эхолота. Требовалось согласовать всю эту информацию для получения комбинированной модели рельефа. Для повышения качества моделей рельефа авторами создан алгоритм обработки триангуляций, позволяющий удалить артефакты моделей, построенных по изолиниям. Использовалась также собственная разработка — библиотека для построения и обработки триангуляций, которая отличается надежностью, а также тем, что может с высокой скоростью обрабатывать большие наборы данных. Ряд задач выполнялся с помощью программы QGIS и бесплатной версии программы EasyTrace.

Поясним выбор источников информации для построения комбинированной модели рельефа и рассмотрим алгоритмы, которые применялись.

### 1.1. Источники информации

Информация о рельефе местности сравнительно легко доступна из различных источников. Данные SRTM имеют широкое покрытие, но их разрешение (30 м/пиксель) слишком низкое, чтобы можно было получить требуемую точность оценок уровня воды. Данные ASTER имеют такое же разрешение, но в данных по Иркутской области много неточностей и в целом их качество значительно хуже. Высококачественная (10 м/пиксель) модель рельефа WorldDEM [14] имеется в продаже, но к моменту запуска проекта минимальный размер заказа составлял 500 кв. км (цена превысила бы значительную часть бюджета проекта). Что еще более важно, у нас к тому времени не было практического опыта использования данных WorldDEM, чтобы быть уверенными в реальном качестве данных (а случай с ASTER показывает, что полностью доверять рекламным обещаниям не стоит).

В результате сделан выбор в пользу применения имеющихся векторных топографических карт масштаба 1:50 000, а на отдельных участках — 1:25 000. В векторных картах достаточно точно представлены береговые линии, что позволяет использовать технику морфинга карт для совмещения подводных данных с надводным рельефом (см. разд. 1.3). Основные недостатки имеющихся топографических карт — это большое сечение рельефа (20 м — для любых открытых карт), не всегда актуальное состояние местности (иногда около 2000 г.) и наличие ошибок, проявляющихся при сравнении с космическими снимками. Несмотря на эти недостатки, топооснова оказалась лучшим доступным источником информации о рельефе.

После построения модели рельефа по изолиниям на ней становятся заметны характерные артефакты — горизонтальные участки, полученные по точкам изолиний одного уровня. В результате гребни и ложбины выглядят как лестницы, состоящие из большого числа ступеней. Для устранения этих артефактов разработан специальный алгоритм. Кроме того, алгоритм построения модели рельефа по векторным данным позволяет задавать несколько различных ролей векторных слоев. Это изолинии рельефа и отметки высот, отметки уреза воды, изобаты и отметки глубин, прочие водные объекты, озера, потоки, контуры. Построение модели выполняется в несколько этапов обработки соот-

ветствующих им видов слоев. При наличии отметок уреза воды по ним помимо точек результирующей триангуляции строится вспомогательная триангуляция, описывающая поверхность уровня воды. Относительно этой поверхности отсчитываются отметки глубин, а высоты точек прочих водных объектов непосредственно берутся с этой триангуляции. Озера (и водохранилища) имеют постоянную высоту, которая определяется ближайшим урезом воды. Помимо основной триангуляции озера также влияют на поверхность уровня воды. Потоки описывают линейные водные объекты, не выраженные в масштабе (ручьи, небольшие реки), для определения высоты точек которых выполняется линейная интерполяция между точками пересечения этими объектами изолиний. Наличие потоков позволяет уточнить рельеф и убрать вышеупомянутые артефакты в тех распадах, где они протекают.

В отличие от наземного рельефа очень трудно найти какую-либо информацию о подводном рельефе. В начале работ была надежда найти старые топографические карты района Братского водохранилища до его затопления. Тогда можно было бы получить некоторую информацию о подводном рельефе, который был наземным на момент создания карт. К сожалению, наполнение ложа Братского водохранилища началось в 1961 г., а топографическая карта Иркутской области впервые была создана в 1970-х гг., поэтому карты с рельефом ложа водохранилища до затопления в основном не существуют. Правда, на отдельных трапециях некоторых участков водохранилища присутствуют изолинии рельефа (не изобаты).

Таким образом, единственным обнаруженным нами источником информации о подводном рельефе являются лоцманские карты [6]. Дата съемки лоцманских карт даже намного старше (1974 г.), чем у топографических карт, но это все, что у нас есть. Кроме того, лоцманские карты очень схематичны и не могут быть непосредственно совмещены с гораздо более точными контурами топографической основы. Поэтому был разработан алгоритм морфинга карт, позволяющий подтянуть контуры объектов лоцманских карт к объектам топоосновы.

Реальное состояние подводного рельефа в ряде интересующих районов исследовано в ходе экспедиции с помощью портативного эхолота с собственным GPS-приемником в сочетании с профессиональным геодезическим приемником. Полученные треки использовались для обновления модели рельефа на этих участках, для этого был разработан алгоритм замены фрагмента триангуляции.

## 1.2. Модель подводного рельефа

Для получения векторного представления рельефа отсканированы и векторизованы бумажные листы лоций с помощью программы EasyTrace 7.99. В результате получены карты в формате Shape. Листы карт ориентированы произвольно, поэтому требуется выполнить преобразование координат, чтобы карты совместить с топоосновой. Для поиска параметров преобразования координат используется метод наименьших квадратов, для чего требуется найти список пар характерных точек, присутствующих на обеих картах.

После поворота и сдвига совпадение топографической и лоцманской карт все равно не будет идеальным, потому что лоцманская карта очень схематична. Поскольку обе карты содержат изображения береговых линий, их можно попытаться сопоставить. С этой целью использовались ранее разработанная технология и программное обеспечение для морфинга карт, которое позволяет задавать совпадения между точками линий

двух карт и в результате получать преобразование неточной карты, перемещающее все ее точки в более правильное положение. Алгоритм морфинга использует триангуляцию, каждой вершине которой сопоставлен вектор сдвига, что далее служит для определения вектора смещения любой точки плоскости посредством линейной интерполяции этих векторов на том треугольнике, в который точка попадает [1, 2, 10]. Сами по себе сдвинутые береговые линии нам не нужны (потому что уже имеются более точные), но получаемое при этом преобразование координат позволяет переместить все остальные слои лоцманской карты в положения, не противоречащие топографической карте [6].

### 1.3. Программное обеспечение для обработки триангуляции

Разработанная авторами программа TIN Smith для работы с триангуляциями и программные библиотеки, которые могут включаться в состав других программных продуктов, сочетают в себе наиболее эффективные подходы к построению триангуляций Делоне и триангуляций Делоне с ограничениями. Используются алгоритм динамического хеширования [10] для ускорения поиска треугольника, в который попадает точка, и робастные предикаты [15] для точного определения взаимного расположения точек, несмотря на ограничения точности выполняемых компьютером вычислений, а также ряд оригинальных алгоритмов преобразования триангуляций. В результате алгоритмы корректно работают на очень больших наборах данных (рис. 1). Эти программные библиотеки применялись для решения сложных практических задач, например автоматической генерализации карт г. Иркутска.

### 1.4. Обработка измерений, полученных при помощи эхолота

В ходе экспедиции по уточнению подводного рельефа Братского водохранилища для замеров глубин использовался портативный эхолот со встроенным GPS-приемником. Основным недостатком данных, собираемых эхолотом, является округление измеренных координат до целых значений в метрах, что приводит к сильному искажению (ступенчатости) получаемых треков. Точность GPS-приемника эхолота соответствует обычному

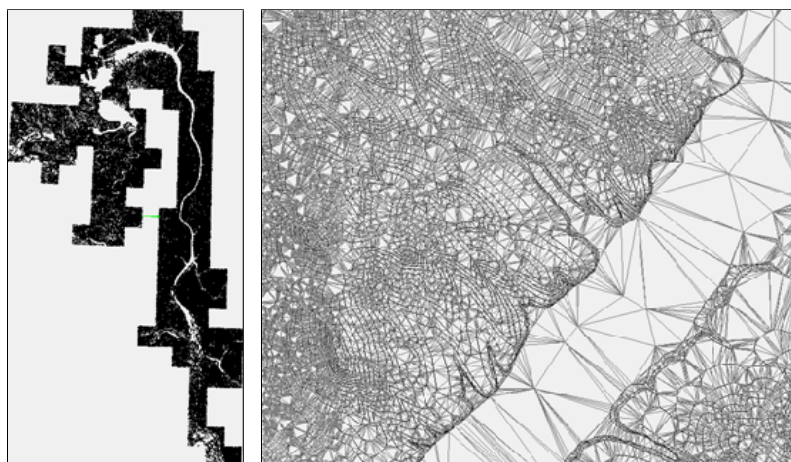


Рис. 1. Триангуляция, представляющая модель рельефа вокруг Братского водохранилища, построенная по картам масштаба 1:50 000, и фрагмент модели рельефа

Fig. 1. The overview of the apriory relief model and a fragment of the apriory relief model

навигатору (несколько метров), поэтому вместе с эхолотом, как правило, использовался профессиональный геодезический приемник. Профессиональный геодезический приемник позволял точно определять отметки уровня воды, относительно которых измеряется глубина, и в большинстве случаев размещался в лодке вместе с эхолотом.

В дальнейшем трек профессионального приемника был совмещен с отметками глубин, измеренными эхолотом, при использовании записываемых обоими приборами отметок времени измерений по сигналам GPS [9]. Выходной файл профессионального GPS-приемника записывает положение своего датчика каждую секунду, а эхолот — с более высокой частотой — в несколько миллисекунд. Эхолот записывает время в миллисекундах как целые числа, но округление горизонтальных координат до метров может привести к тому, что несколько измерений будут отнесены к одной и той же точке. Для сопоставления координат, получаемых двумя устройствами, применяется линейная интерполяция с использованием специально разработанной программы.

На рис. 2 представлен трек с результатами проверки оборудования, проведенной перед экспедицией. Видно, что погрешность определения координат эхолотом в основном носит систематический характер (постоянный сдвиг всех точек в одном направлении).

### 1.5. Уточнение модели рельефа

Поскольку данные лоцманской карты дают довольно приблизительное представление о подводном рельефе, нет смысла пытаться как-то объединить их с более точными данными, полученными эхолотом. Был разработан алгоритм замены фрагмента триангуляции, позволяющий убрать все отметки глубин, взятые с лоцманской карты, в той области, для которой были выполнены измерения. Он предварительно удаляет все точ-



Рис. 2. Трек эхолота (зеленые кружки), соответствующий профессиональный трек GNS (красные кружки) и сдвиги, рассчитанные с использованием меток времени для точек эхолота (зеленые линии)

Fig. 2. The echo sounder track (green circles), the corresponding professional GNS track (red circles), and the shifts computed using the time stamps for the echo sounder points (green lines)

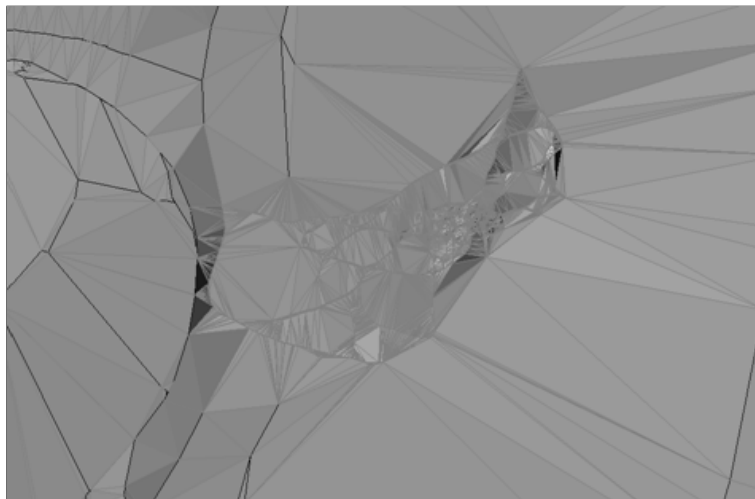


Рис. 3. Модель рельефа с фрагментом, уточненным по результатам измерений эхолотом  
Fig. 3. The relief model with the fragment replaced by echo sounder measurements

ки целевой триангуляции, попадающие во внутренние треугольники добавляемой триангуляции.

Таким образом, для создания результирующей модели рельефа в интересующей области сначала из исходной модели рельефа вырезается прямоугольный фрагмент, затем создается вспомогательная триангуляция по выполненным в этой области эхолотом измерениям и в модели рельефа заменяются соответствующие фрагменты. Пример полученной таким образом триангуляции показан на рис. 3 (черные линии — жесткие ребра целевой триангуляции). Из-за низкого качества априорной модели подводного рельефа уточненные фрагменты обычно выделяются на фоне остальных частей модели.

Несмотря на то что наши знания о подводном рельефе Братского водохранилища (как и практически всех других водоемов) крайне ограничены и неточны, в результате применения разработанных алгоритмов стало возможным получить модель рельефа с точностью, достаточной для проведения дальнейших гидрологических расчетов.

### 1.6. Алгоритм определения береговых линий на основе данных ДЗЗ

Спутниковое дистанционное зондирование позволяет осуществить максимальный охват наблюдаемой территории. Съемка любого фрагмента территории с таких спутников, как Sentinel и Landsat, проводится регулярно, раз в несколько дней, а полученные данные находятся в свободном доступе с разрешением 10 м на пиксель для основных каналов. Поэтому за последние пару десятилетий можно найти снимки практически для любого интересующего периода времени. Было бы очень полезно использовать эту информацию для уточнения информации о рельефе.

В течение нескольких лет бассейны оз. Байкал, а также Иркутского и Братского водохранилищ находились в состоянии маловодья, которое закончилось в 2019 г., затем наступил период многоводья. За последние несколько лет произошли существенные колебания уровня воды в этих бассейнах, что позволяет увидеть реальные контуры береговых линий, соответствующие различным уровням воды и различным величинам расходов воды на ГЭС. Таким образом, если бы удалось получить достаточно точную информацию о положении береговых линий в различные моменты времени и информа-

цию об уровне воды в эти моменты, то из этих контуров получилось бы собрать модель рельефа для диапазона высот, соответствующего диапазону колебаний уровня воды за рассматриваемый период.

Несмотря на то что длина Байкала составляет около 600 км и на нем возникают приливы и сейши (стоячие волны), в первом приближении этими явлениями можно пренебречь, так как максимальный (Солнце плюс Луна) прилив изменяет уровень воды всего на 32 мм, а сейши — не более чем на 60 мм. Наиболее заметное явление, которое может исказить результаты, — это волны. Еще одним объектом в Иркутской области, подходящим для отработки рассматриваемой технологии, является Братское водохранилище, где изменение уровня воды составляет до 4 м в год, а общий многолетний диапазон колебаний — около 6 м. Все рассматриваемые объекты имеют очень большую площадь, и использование любых платных источников данных сразу значительно увеличивает бюджет любого проекта. Поэтому основной целью выполненного исследования было выяснить, какие наилучшие результаты можно получить, используя свободно доступные данные дистанционного зондирования Земли.

Основная проблема с открытыми данными ДЗЗ заключается в том, что они имеют разрешение не более 10 м на пиксель, чего может быть недостаточно для обнаружения изменений уровня воды в диапазоне менее 1 м. Ранее в ходе реализации проекта, для которого требовалось выполнить топобатиметрию русла р. Ангары, для уточнения рельефа сделана попытка использовать береговые линии, получаемые по открытым спутниковым данным среднего разрешения (10 м/пиксель). Для этого применен традиционно рекомендуемый подход к нахождению береговых линий, который включает: вычисление растра NDWI [NDWI]; его бинаризацию по порогу; получение ступенчатых векторных границ между черными и белыми пикселями; сглаживание этих границ. Однако анализ полученных таким образом данных показал, что их точность явно недостаточна для решения рассматриваемой задачи.

Тем не менее возможность применения большого объема открытых спутниковых данных очень привлекательна, поэтому мы сделали еще одну попытку к ней вернуться. Рассмотрим основную идею подхода, позволяющего использовать открытые космические снимки среднего разрешения для обнаружения береговых линий с качеством, достаточным для решения практических задач: вместо векторизации бинарных изображений можно сразу строить изолинии полутонового изображения NDWI. На рис. 4 показаны результаты применения двух подходов. Хотя сглаженные границы бинаризованного изображения могут выглядеть достаточно хорошо, заметим, что при постепенном изменении значений пикселей растра NDWI сглаженные линии границ бинаризованного изображения не изменятся, пока значения некоторых пикселей не пересекут порог бинаризации. В то же время изолинии растра NDWI будут немного меняться при любых изменениях значений пикселей, по которым они проходят. Таким образом, контуры на бинаризованном изображении меняются скачкообразно и гораздо менее чувствительны к небольшим изменениям, чем изолинии, а использование изолиний позволяет находить контуры с субпиксельной точностью.

Далее требуется определить, изолиния какого уровня соответствует береговой линии. Для выбора наиболее подходящего порога лучше всего подходят объекты, имеющие четкую границу с водой при любом направлении съемки, например мосты: выбираем уровень, при котором мост четко отделяется от воды. Можно также сравнить расстояние между изолиниями на противоположных сторонах моста с шириной, наблюдаемой на снимках высокого разрешения. После выделения береговой линии на



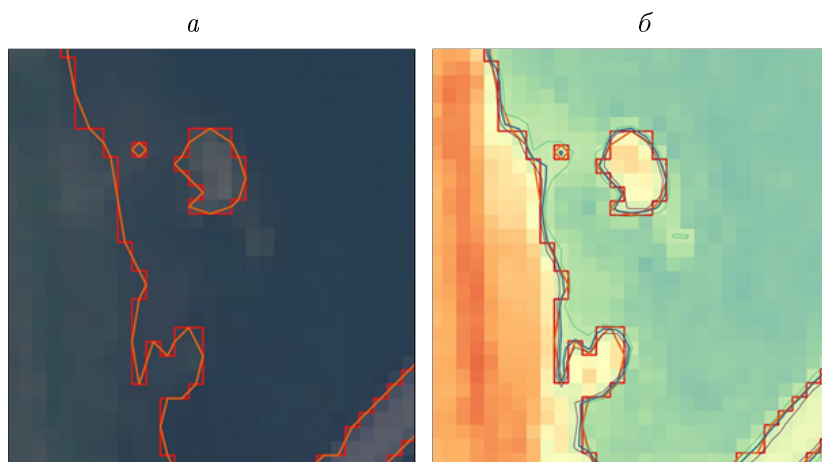


Рис. 4. Результаты выделения береговой линии традиционным и новым подходами: *а* — изолинии бинарного изображения и их сглаженные версии на фоне соответствующего спутникового изображения; *б* — в дополнение к ним показаны изолинии изображения NDWI для уровней 0.05, 0.1 и 0.15 на фоне изображения NDWI в псевдоцветах

Fig. 4. The results of shoreline detection by the traditional and the new approaches: *a* — the isolines of binary image and their smoothed versions over the corresponding true color image; *b* — additionally the contour lines of the NDWI image for the levels 0.05, 0.1 and 0.15 are shown over the NDWI image in pseudo colors

отдельном снимке необходимо сопоставить эти линии с результатами обработки других снимков, полученных при других уровнях воды. Здесь мы сталкиваемся с проблемой точности позиционирования спутниковых данных: для работы на субпиксельном уровне ее оказалось недостаточно, так как сравнение береговых линий на разных снимках показало, что точность позиционирования снимков определяется их разрешением, т. е. может потребоваться сдвинуть получаемые контуры в пределах ( $\pm 10$  м). Для определения направления такого сдвига требуется найти общие ориентиры на двух снимках. К сожалению, горизонтальное положение изображений любых объектов может меняться в зависимости от направления съемки и высоты над уровнем моря этих объектов (для иллюстрации можно сравнить относительное расположение крыш и фундаментов домов на разных снимках одной местности).

Поэтому для совмещения снимков требуется использовать четко различимые объекты, находящиеся на уровне воды, и не получается найти ничего более подходящего для этих целей, чем сами контуры береговых линий. Для решения этой задачи разработан алгоритм, выделяющий в области пересечения двух снимков общие для них контуры береговых линий максимальной длины и за несколько итераций находящий вектор сдвига, минимизирующий расстояние между этими контурами.

На рис. 5 показаны результаты такой обработки. Здесь представлены изолинии за 2016 и 2020 гг. при близких уровнях Байкала (456.45 и 456.52 м), а также изолиния за 2017 г. на уровне 456.02 м. Видно, что близкие по уровню изолинии переплетены друг с другом, что позволяет оценить точность получаемых рассматриваемым методом результатов. Надо учесть, что часть отличий обусловлена реальными изменениями, произошедшими за 4 года. Близкие по уровню изолинии можно усреднять для получения более точного результата, в котором нивелируются случайные погрешности. Для этого проще всего строить изолинии по усредненному растру NDWI.



Рис. 5. Изолинии растров NDWI с трех снимков на фоне снимков Яндекс Спутник, даты и уровни воды — в подписях к изолиниям

Fig. 5. Isolines of NDWI rasters from three images against the background of Yandex Sputnik images, dates and water levels — in the captions to the isolines

Таким образом, выделение изолиний на растрах NDWI, соответствующих разным уровням воды, позволяет по открытым спутниковым снимкам получить контуры изолиний с точностью, достаточной для построения модели прибрежного подводного рельефа, которая согласуется с моделями наземного и подводного рельефа для большей глубины. Массовому автоматическому применению этого метода препятствует проблема облаков: полностью безоблачных снимков очень мало. Кроме того, исследованные доступные алгоритмы выделения облаков и теней от них (дополнение *i.sentinel* для GRASS GIS, *Sen2Cor* [16]) оказались недостаточно точными: они, с одной стороны, обнаруживают только небольшую часть облаков, а с другой — могут воспринимать пиксели вдоль береговой линии, представляющие для нас наибольший интерес как принадлежащие облакам или их теням.

## Заключение

В результате выполнения ряда проектов получены совмещенные 3D-модели рельефа для ряда водных объектов и их участков (Иркутское и Братское водохранилища, поселок Листвянка (рис. 6, модель совмещенного рельефа на участке протяженностью порядка 132 км от ГЭС в г. Иркутске до впадения р. Белой в Ангару), разработана оригинальная технология [1, 2] сопряжения надводного рельефа с подводным.

Показано, что контурные линии растровых изображений NDWI, рассчитанные по открытым данным ДЗЗ, позволяют выделять береговые линии с субпиксельной точностью. На примере фрагмента водного объекта продемонстрировано, что достаточно обработать принятые за год спутниковые снимки для получения полной информации о прибрежном рельефе. Предложен алгоритм совмещения контуров по нескольким изображениям.

К сожалению, нельзя сделать процесс полностью автоматизированным, потому что не удалось найти удовлетворительного решения более общей проблемы обнаружения облаков. Общеизвестные алгоритмы и методы, которые были испробованы авторами, показали себя с худшей стороны.

Кроме того, требуется разработать методику объединения изолиний для различных уровней воды в общую модель местности, которая будет учитывать возможные ошибки

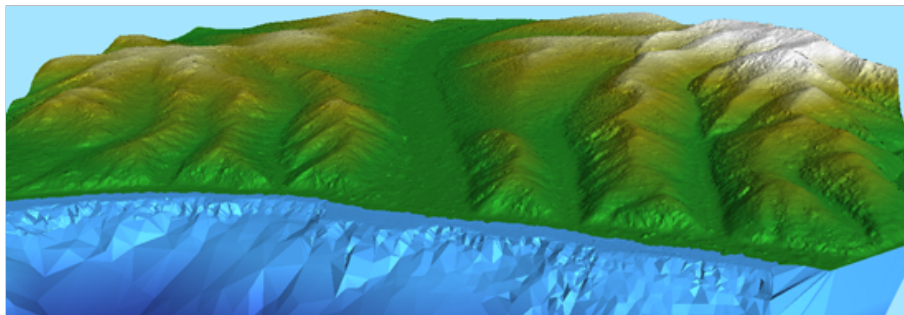


Рис. 6. Совмещенная модель рельефа пос. Листвянка. Полевые промеры глубин выполнены до 50-метровой отметки зоны залива Лиственничный. Подводный рельеф получен по результатам измерений при помощи эхолотационной съемки рельефа дна урезовой зоны. Рельеф наземной части создан на основе космоснимка WorldDem

Fig. 6. Combined relief model of the Listvyanka settlement. Field measurements of depths were made up to the 50-meter mark of the Listvennichny Bay zone. The underwater relief was obtained from the results of measurements using echolocation survey of the bottom relief of the shore zone. The relief of the ground part was created on the basis of the WorldDem satellite image

в изолиниях и позволит нейтрализовать эти ошибки за счет сбора большего количества данных.

Результаты получены 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).

**Благодарности.** Работа поддержана грантом № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории”).

## Список литературы

- [1] **Вучков I., Gachenko A., Rugnikov G., Hmelnov A.** 3-D modeling of Angara river bed. Proceedings of the International Conference of Mathematical and Information Technologies. Katun; 2016: 26–32.
- [2] **Gachenko A.S., Hmelnov A.E., Hmelnova T.F., Rugnikov 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. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018; (190):012028. DOI:10.1088/1755-1315/190/1/012028.
- [3] **Gubin N.A., Grigorev K.A., Poletaev A.S., Chensky A.G.** Combined hydroacoustic research of Lake Baikal. Journal of Physics: Conference Series. 2021; (1728):012005. DOI:10.1088/1742-6596/1728/1/012005.
- [4] **Ramnath V., Feygels V., Kalluri H., Smith B.** CZMIL (Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar) bathymetric performance in diverse littoral zones. Proceedings of the “OCEANS 2015”. MTS/IEEE Washington; 2015: 1–10. DOI:10.23919/OCEANS.2015.7404574.

- [5] **Glukhov V., Goldin Yu., Rodionov M.A.** Airborne LIDAR bathymetry of coastal areas at high flight altitude. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2019; (12):85–93. DOI:10.7868/S2073667319040105.
- [6] Карта Братского водохранилища (лоция). Министерство речного флота, Главводпуть. Иркутск; 1974. rkutsk; 1974. (In Russ.)
- [7] **Salameh E., Frappart F., Almar R., Baptista P., Heygster G., Lubac B., Raucoules D., Almeida L.P., Bergsma E.W.J., Capo S., De Michele M., Idier D., Li Z., Marieu V., Poupardin A., Silva P.A., Turki I., Laignel B.** Monitoring beach topography and nearshore bathymetry using spaceborne remote sensing: a review. *Remote Sensing*. 2019; 11(19):2212. DOI:10.3390/rs11192212.
- [8] **Алексеев А.Г., Зубченко Э.С.** Современная технология спутниковой батиметрии. *Навигация и гидрография*. 2014; (37):73–81.
- [9] GPS interface specification 2012 Navstar GPS space segment/navigation user segment interfaces (IS-GPS-200G). Available at: <http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200G.pdf>. (accessed at May 29, 2022).
- [10] **Скворцов А.В.** Триангуляция Делоне и ее применение. Томск; 2002: 128. Адрес доступа: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000142524>. (дата обращения 29.05.2022)
- [11] **Новсеруан А., Тераносян Г., Muradyan V., Asmaryan S., Medvedev A., Koshkarev A.** Lake Sevan shoreline change assessment using multi-temporal landsat images. *Geography, Environment, Sustainability*. 2019; 2(4):212–229. DOI:10.24057/2071-9388-2019-46.
- [12] **Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S.** High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. 2016; 540(7633):418–422. DOI:10.1038/nature20584.
- [13] **Himmelstoss E.A., Farris A.S., Henderson R.E., Kratzmann M.G., Ergul A., Zhang O., Zichichi J.L., Thieler E.R.** Digital shoreline analysis system (version 5.0): U.S. Geological Survey software release. 2018. Available at: <https://code.usgs.gov/cch/dsas>. (accessed at May 29, 2022)
- [14] Airbus defence and space elevation models. Available at: <http://www.intelligence-airbusds.com/elevation-models>. (accessed at May 29, 2022)
- [15] **Shewchuk J.R.** Adaptive precision floating-point arithmetic and fast robust geometric predicates. *Discrete & Computational Geometry*. 1997; (18):305–363.
- [16] Sen2Cor configuration and user manual. Ref.: S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.9. 2020: 56. Available at: <http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.9.0/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.9.0.pdf>. (accessed at May 29, 2022)

### Sources of information about underwater, coastal and ground relief and their application for construction of combined relief models

HMELNOV ALEXEY E., GACHENKO ANDREY S.\*

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, 664033, Irkutsk, Russia

\*Corresponding author: Gachenko Andrey S., e-mail: [gachenko@icc.ru](mailto:gachenko@icc.ru)

Received June 08, 2022, accepted June 30, 2022.

### Abstract

The article addresses the experience gained in processing data on the relief of water bodies, such as the Irkutsk and Bratsk reservoirs, for the purpose of obtaining a combined terrain model that collects data from various sources, such as topographic and pilot maps, the results of depth measurements with an echo sounder, the contour of coastlines received from earth remote sensing data. The authors have considered the use of 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 implemented algorithms include removal of triangulation artifacts built on the contours of the relief and morphing of maps to match the underwater part of the relief with the surface one, and a replacement of the triangulation fragment. The resulting relief model contains all the information about the relief of the study 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. Sources of information about underwater, coastal and ground relief and their application for construction of combined relief models. Computational Technologies. 2022; 27(5):55–68. DOI:10.25743/ICT.2022.27.5.006. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant № 0075-15-2020-787 for implementation of Major scientific projects on priority areas of scientific and technological development (the project “Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory”)

### References

1. **Bychkov I., Gachenko A., Rugnikov G., Hmelnov A.** 3-D modeling of Angara river bed. Proceedings of the International Conference of Mathematical and Information Technologies. Katun; 2016: 26–32.
2. **Gachenko A.S., Hmelnov A.E., Hmelnova T.F., Rugnikov 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. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018; (190):012028. DOI:10.1088/1755-1315/190/1/012028.
3. **Gubin N.A., Grigorev K.A., Poletaev A.S., Chensky A.G.** Combined hydroacoustic research of Lake Baikal. Journal of Physics: Conference Series. 2021; (1728):012005. DOI:10.1088/1742-6596/1728/1/012005.
4. **Ramnath V., Feygels V., Kalluri H., Smith B.** CZMIL (Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar) bathymetric performance in diverse littoral zones. Proceedings of the “OCEANS 2015”. MTS/IEEE Washington; 2015: 1–10. DOI:10.23919/OCEANS.2015.7404574.
5. **Glukhov V., Goldin Yu., Rodionov M.A.** Airborne LIDAR bathymetry of coastal areas at high flight altitude. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2019; (12):85–93. DOI:10.7868/S2073667319040105.
6. Karta Bratskogo vodokhranilishcha (lotsiya). Ministerstvo rechnogo flota, Glavvodput' [Map of the Bratsk reservoir (pilot)]. Irkutsk; 1974. (In Russ.)
7. **Salameh E., Frappart F., Almar R., Baptista P., Heygster G., Lubac B., Raucoules D., Almeida L.P., Bergsma E.W.J., Capo S., De Michele M., Idier D., Li Z., Marieu V., Poupardin A., Silva P.A., Turki I., Laignel B.** Monitoring beach topography and nearshore bathymetry using spaceborne remote sensing: a review. Remote Sensing. 2019; 11(19):2212. DOI:10.3390/rs11192212.
8. **Alekseev A.G., Zubchenko E.S.** Sovremennaya tekhnologiya sputnikovoy batimetrii [Modern technology of satellite bathymetry]. Navigatsiya i Gidrografiya. 2014; (37):73–81. (In Russ.)
9. GPS interface specification 2012 Navstar GPS space segment/navigation user segment interfaces (IS-GPS-200G). Available at: <http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200G.pdf>. (accessed at May 29, 2022).

10. **Skvortsov A.V.** Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk; 2002: 128. Available at: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000142524>. (accessed at May 29, 2022) (In Russ.)
11. **Hovsepyan A., Tepanosyan G., Muradyan V., Asmaryan S., Medvedev A., Koshkarev A.** Lake Sevan shoreline change assessment using multi-temporal landsat images. *Geography, Environment, Sustainability*. 2019; 2(4):212–229. DOI:10.24057/2071-9388-2019-46.
12. **Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S.** High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. 2016; 540(7633):418–422. DOI:10.1038/nature20584.
13. **Himmelstoss E.A., Farris A.S., Henderson R.E., Kratzmann M.G., Ergul A., Zhang O., Zichichi J.L., Thieler E.R.** Digital shoreline analysis system (version 5.0): U.S. Geological Survey software release. 2018. Available at: <https://code.usgs.gov/cch/dsas>. (accessed at May 29, 2022)
14. Airbus defence and space elevation models. Available at: <http://www.intelligence-airbusds.com/elevation-models>. (accessed at May 29, 2022)
15. **Shewchuk J.R.** Adaptive precision floating-point arithmetic and fast robust geometric predicates. *Discrete & Computational Geometry*. 1997; (18):305–363.
16. Sen2Cor configuration and user manual. Ref.: S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.9. 2020: 56. Available at: <http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.9.0/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.9.0.pdf>. (accessed at May 29, 2022)