

DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.006

Алгоритмы уточнения модели прибрежного рельефа по данным воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки

А. Е. ХМЕЛЬНОВ*, А. С. ГАЧЕНКО

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

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

Поступила 10 октября 2023 г., принята в печать 17 октября 2023 г.

Для определения влияния изменения уровня оз. Байкал на экосистему его мелководной зоны и прибрежных территорий, а также нижнего бьефа Иркутской ГЭС потребовалось использовать модель прибрежного рельефа. В результате выполнения работы получена совмещенная модель прибрежного рельефа, по которой были построены зоны затопления. Для решения этой задачи разработаны и применены оригинальные алгоритмы обработки растровых пространственных данных и триангуляций.

Ключевые слова: прибрежный рельеф, модель береговой линии, триангуляция Делоне, зоны затопления.

Цитирование: Хмельнов А.Е., Гаченко А.С. Алгоритмы уточнения модели прибрежного рельефа по результатам воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки. Вычислительные технологии. 2023; 28(6):57–67. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.006.

Введение

В настоящее время выполняется комплексная научно-исследовательская работа по обоснованию принципов регулирования уровня оз. Байкал при различных условиях водности с учетом современных экологических, социально-экономических и водохозяйственных требований на основе мониторинга. В проекте участвуют коллективы нескольких академических институтов из разных регионов страны, включая Иркутскую область и республику Бурятия. В рамках научного проекта проводятся аналитические работы для определения влияния изменения уровня оз. Байкал на экосистему его мелководной зоны и прибрежных территорий. Для их выполнения необходимо иметь комплексные цифровые модели рельефа прибрежных мелководных зон и прибрежных территорий, подверженных потенциальным ущербам при регулировании уровня оз. Байкал.

Для построения априорной (до получения дополнительной информации) модели рельефа помимо векторной топоосновы использованы данные о подводном рельефе оз. Байкал, а также лоции р. Ангары [1] и Иркутского водохранилища [2]. После сопоставления полученных по этой модели примерных зон затопления с картами расположения населенных пунктов и других рассматриваемых в проекте искусственных и природных объектов, выбраны участки территории, нуждающиеся в уточнении модели рельефа.

С целью уточнения модели рельефа приобретены архивные данные воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и выполнена аэрофотосъемка (АФС) тех участков, для которых такие данные отсутствовали. Полученные обоими способами данные о рельефе представляют собой облака точек большого объема. Предложен метод обработки этих данных для уточнения фрагментов модели рельефа.

Для представления моделей рельефа использовались триангуляции (нерегулярные триангуляционные сети, TIN — triangular irregular network) — одна из основных структур данных ГИС [3]. Для построения и обработки триангуляций Делоне и триангуляций Делоне с ограничениями применялась быстрая, надежная и способная обрабатывать большие наборы данных библиотека, созданная в ИДСТУ СО РАН [4]. С использованием этой библиотеки реализована интерактивная программа TINSmith, а также консольная утилита TrgCmd.

Далее упомянутые этапы обработки данных и полученный в ходе их выполнения опыт будут рассмотрены более подробно.

1. Построение комбинированной модели рельефа

Для создания комбинированных моделей рельефа (объединенного наземного рельефа с прибрежной подводной частью) были использованы различные источники информации, в том числе: отметки глубин и изобаты, оцифрованные с лоцманских карт водохранилища, промеры глубин, сделанные во время экспедиций прошлых лет с помощью эхолота. Требовалось согласовать всю эту информацию для получения комбинированной модели рельефа. Для повышения качества моделей рельефа, построенных с использованием горизонталей топоосновы, применен разработанный авторами алгоритм обработки триангуляций, позволяющий удалить артефакты моделей, построенных по изолиниям. Ряд задач выполнялся с помощью программы QGIS и бесплатной версии программы EasyTrace.

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 оригинальный алгоритм [4].

Для векторного представления подводного рельефа с помощью программы EasyTrace 8.65 были отсканированы и векторизованы бумажные листы лоций. В результате получены карты в формате Shape. Листы карт ориентированы произвольно, поэтому требуется выполнить преобразование координат, чтобы совместить эти карты с топоосновой. Для поиска параметров такого преобразования координат используется метод наименьших квадратов, для работы которого требуется задать 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, эти изображения можно попытаться сопоставить. Разработанные технология и программное обеспечение для морфинга карт позволяют задавать соответствия между точками линий двух карт и в результате получать преобразование неточной карты, перемещающее все ее точки в более правильные положения [5]. Алгоритм морфинга использует триангуляцию, каждой вершине которой сопоставлен вектор сдвига, что далее служит для определения аналогичного вектора

для любой точки плоскости в пределах триангуляции посредством линейной интерполяции этих векторов на том треугольнике, куда эта точка попадает. 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.

Разработанный алгоритм построения модели рельефа по векторным данным позволяет задавать несколько различных ролей для таких используемых векторных слоев, как: “изолинии рельефа” и “отметки высот”, “отметки уреза воды”, “изобаты” и “отметки глубин”, “прочие водные объекты”, “озера”, “потоки”, “внешний контур”. Построение модели выполняется в несколько этапов обработки соответствующих им видов слоев. По “отметкам уреза воды” строится вспомогательная триангуляция, описывающая поверхность уровня воды. Относительно этой поверхности отсчитываются глубины “отметок глубин” и “изобат”, а высоты точек “прочих водных объектов” непосредственно берутся с этой триангуляции. “Озера” (к ним относятся и водохранилища) имеют постоянную высоту, которая определяется ближайшим урезом воды. Помимо основной триангуляции “озера” наряду с “отметками уреза воды” также используются и при построении поверхности 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 ступенчатые артефакты в тех распадках, где они протекают.

2. Выбор участков для уточнения модели рельефа

По априорной совмещенной модели рельефа определены населенные пункты и другие объекты, которые могут быть подвержены затоплению. Построены приближенные зоны затопления по этой модели рельефа (с дополнительным буфером, учитывающим неточность имеющихся данных), которые были сопоставлены с картами рассматриваемых объектов. Для участков, где есть пересечение этих слоев, требуется уточнение модели рельефа. В результате были разработаны обзорные карты (схемы) ключевых участ-

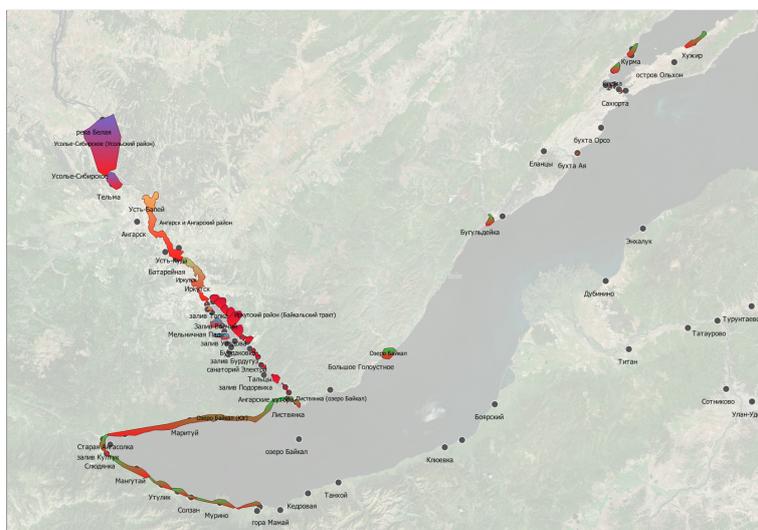


Рис. 1. Схема исследуемой территории

Fig. 1. The sketch map of the area under consideration

ков, включая расположенные на них населенные пункты и другие объекты (рис. 1), подверженные рискам при колебании уровня Байкала в диапазоне подъема до 460 м в Тихоокеанской системе (ТО).

3. Исходные данные для уточнения модели рельефа на выбранных участках

Для уточнения модели рельефа на большей части ключевых участков использовались приобретенные в специализированной организации архивные данные (2017–2022 гг.) воздушного лазерного сканирования. Результаты ВЛС получены в виде облаков точек — текстовых файлов, содержащих большое количество точек (большая часть участков содержит несколько миллионов точек, есть участок с 37 млн). Данные имеют сопроводительные документы, подтверждающие, что полученные результаты могут использоваться для научных целей и не имеют никаких ограничений на применение для построения моделей рельефа.

Кроме того, выполнена аэрофотосъемка около десяти участков, для которых отсутствовали архивные данные. Аэрофотосъемка проводилась с высоты 100, 153 и 220 м. Получаемые в результате съемки изображения позволяют создавать при помощи специализированного лицензионного программного обеспечения (Agisoft Metashape PRO) ортофотопланы и 3D-модели рельефа (цифровые модели местности) с точностью выше, чем 10 см на пиксель, что приблизительно соответствует масштабу топографического плана М 1:1000. При проведении АФС обеспечивалось продольное и поперечное перекрытие снимков около 70 % для обеспечения качественного построения 3D-модели (каждый полет выполнялся продольными и поперечными галсами).

4. Технология обработки облаков точек

Непосредственное включение таких данных в итоговую 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. Например, на рис. 2 заметны пешеходные “островки” на парковке, кучи грунта рядом с котлованом строящегося здания, а также следы удаления из облака точек откликов от зданий и других объектов.



Рис. 2. Пример изображения, построенного по результатам ВЛС (фрагмент триангуляции). Видны “островки” на парковке, особенности конструкции крыши

Fig. 2. An example of image constructed using airborne laser scanning results (a fragment of triangulation). We can see pedestrian islands in the parking and roof design details

Построение изолиний непосредственно по такой модели приведет к тому, что они будут отражать все эти особенности, например огибать бордюры вокруг “островков”. Поэтому предложена технология обработки облаков точек, позволяющая получить уточненную, но менее детальную, чем исходные данные ВЛС и АФС, модель фрагмента рельефа с необходимой точностью.

4.1. Выделение незаполненных треугольников

Для работы с облаками точек использованы алгоритмы построения триангуляций Делоне и триангуляций Делоне с ограничениями, реализованные в программе TINSmith. После собственно построения триангуляции к ней применен алгоритм поиска незаполненных треугольников, при работе которого граничные треугольники, еще считающиеся заполненными, имеющие внешнее ребро (ребро, граничащее с треугольником, помеченным как вспомогательный) длиннее заданного порога, последовательно помечаются как вспомогательные. Алгоритм начинает работу в состоянии, когда вспомогательными являются лишь треугольники с вершиной из суперструктуры [3], а заканчивает, когда длина всех внешних ребер граничных треугольников станет меньше пороговой. Такая фильтрация треугольников впоследствии влияет на результаты растеризации: всем точкам, попадающим во вспомогательные треугольники, присваивается значение “нет данных”.

4.2. Гауссовская фильтрация по маске

Для получения более гладкой модели рельефа применялась растеризация триангуляционной модели с последующим ее сглаживанием с использованием гауссовского фильтра. Растеризация выполнялась с шагом 20 см/пиксель. Алгоритм гауссовской фильтрации пришлось доработать, чтобы он корректно игнорировал значения “нет данных”, поскольку в имеющихся ГИС, к удивлению авторов, такую возможность найти не удалось: все реализации этого алгоритма обрабатывают пиксели со значением “нет данных” как имеющие то числовое значение, которое его обозначает, и в результате “размазывают” это значение по соседним пикселям, что приводит к существенным искажениям на границе заполненной области (рис. 3, б).

Доработанный алгоритм гауссовской фильтрации по маске работает по следующему принципу (для простоты рассмотрим одномерный случай и непрерывную форму записи):

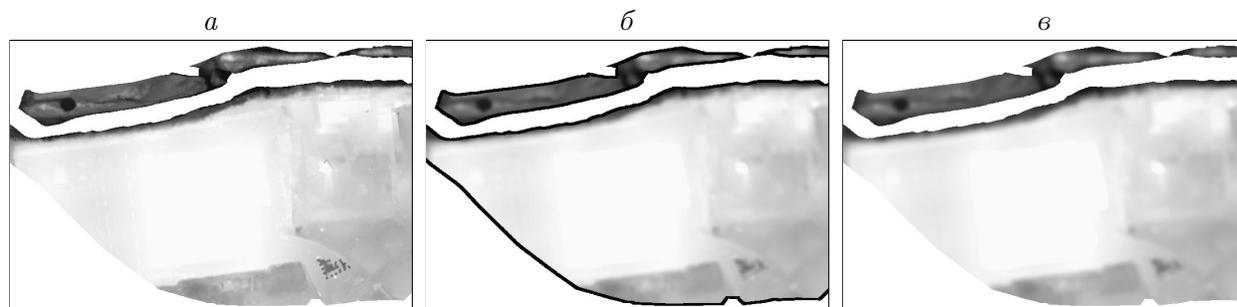


Рис. 3. Исходное растровое изображение со значениями “нет данных” (а) и результаты его гауссовской фильтрации: в QGIS (б) и по маске (в)

Fig. 3. The source raster image with “no data” values (а) and result of its Gauss smoothing: in QGIS (б) and masked (в)

$$f_{gm}(x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(t)m(t)g(x-t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} m(t)g(x-t)dt},$$

где $f(x)$ — сглаживаемое изображение; $f_{gm}(x)$ — результат сглаживания; $m(x)$ — маска наличия данных для этого изображения ($m(x) = 0$ в точках с отсутствием данных, иначе $m(x) = 1$); $g(x)$ — гауссовская функция. Таким образом, здесь результат гауссовской фильтрации для функции $f(t)m(t)$ делится на суммарный вес пикселей фильтра, для которых имеются данные, что позволяет устранить граничные артефакты. На рис. 3, в показан пример работы алгоритма.

4.3. Построение изолиний

После гауссовской фильтрации разрешение раstra было уменьшено до 1 м/пиксель. Далее непосредственно по сглаженному раstrу могут быть построены изолинии. На рис. 4, б приведен пример таких изолиний. На рис. 4, а наглядно продемонстрирована необходимость сглаживания: изолинии, построенные по слишком детальному исходному раstrу, непригодны для практического применения.

Изолинии позволяют определить, какие объекты будут подвержены затоплению при соответствующем уровне воды. Для оз. Байкал и Иркутского водохранилища (без учета достаточно редкой возможности возникновения заметного перепада уровней при слишком быстром по сравнению с пропускной способностью истока сбросе воды на ГЭС) этот уровень задается явно, а для нижнего бьефа требуются расчеты по гидравлической модели, связывающей расходы воды с уровнем на конкретных участках (здесь мы считаем такие фрагменты довольно малыми, чтобы можно было использовать один уровень воды для всего участка).

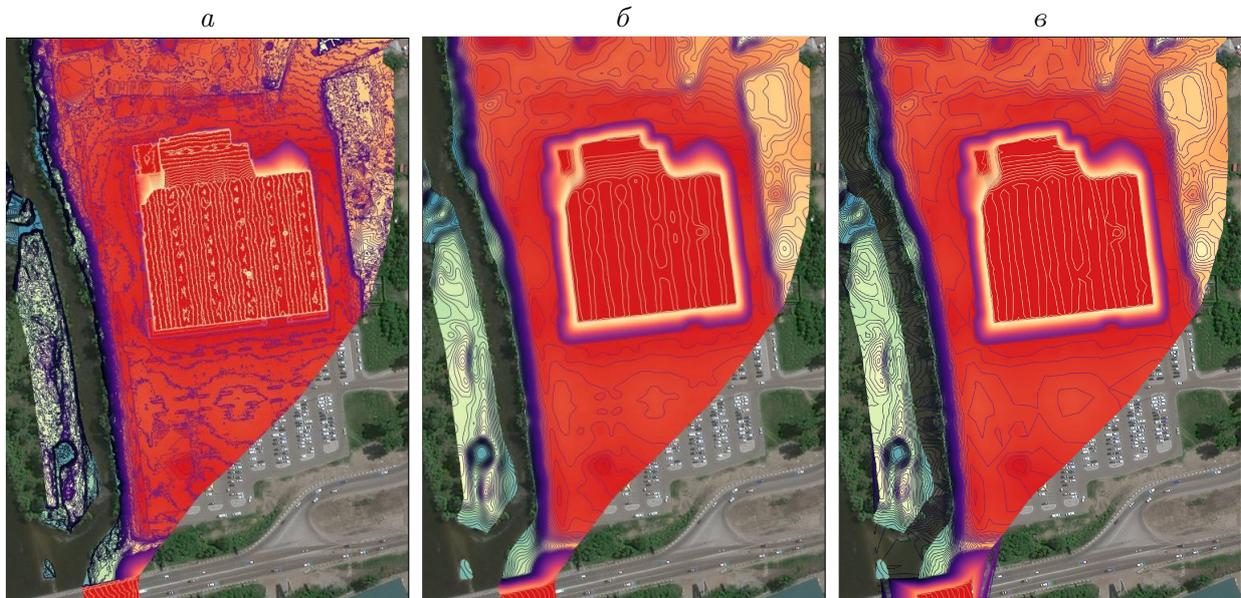


Рис. 4. Изолинии, построенные с шагом 0.1 м по растровой модели до (а) и после сглаживания (б), а также по упрощенной триангуляции (в)

Fig. 4. Contour lines constructed with a step of 0.1 m from raster DEMs before (a) and after smoothing (б), and from the simplified triangulation (в)

4.4. Построение упрощенной триангуляции

Для того чтобы построить общую уточненную модель территории, в которую будут включены все отснятые участки, необходимо получить упрощенные модели этих участков. Для этих целей был использован алгоритм построения триангуляции по растру с фильтрацией точек, который позволяет получить аппроксимацию модели рельефа с заданной точностью. На вход алгоритма подается сглаженный растр с разрешением 1 м/пиксель, при обработке которого использовалась точность аппроксимации 5 см. Алгоритм аппроксимации добавляет в триангуляцию точки растра, на которых достигается максимальное отклонение от триангуляции до тех пор, пока эта величина не станет меньше заданного порога. В результате, например, для конкретного участка после применения всех рассмотренных этапов обработки упрощенная триангуляция содержит 26 467 точек, изначально в облаке точек было 4 510 582 точки. При использовании упрощенной триангуляции для построения изолиний получается результат, показанный на рис. 4, в, который можно сравнить с изолиниями, построенными по сглаженному растру (рис. 4, б). Поскольку изолинии идут с шагом 10 см, видно, что различия незначительны и находятся как раз в пределах 5 см по вертикали.

4.5. Замена фрагментов триангуляции

Далее был использован алгоритм, позволяющий заменить фрагмент триангуляции на более точный, чтобы включить в априорные модели рельефа все уточненные фрагменты. Этот алгоритм сначала исключает из целевой триангуляции вершины, попадающие в основные (не вспомогательные) треугольники триангуляции, описывающей уточненный фрагмент, а затем добавляет туда вершины и жесткие ребра из триангуляции для фрагмента (рис. 5). По результирующей модели рельефа могут быть построены изолинии, описывающие затопление любых фрагментов модельной территории.

4.6. Обработка данных аэрофотосъемки

При фотограмметрической обработке данных АФС так же, как и для данных ВЛС, создается плотное облако точек, которое может содержать чрезмерное их количество (сотни миллионов на небольшой участок). Поэтому дополнительно применялось прореживание плотного облака с заданным шагом в программе MetaShape. Так, прорежива-

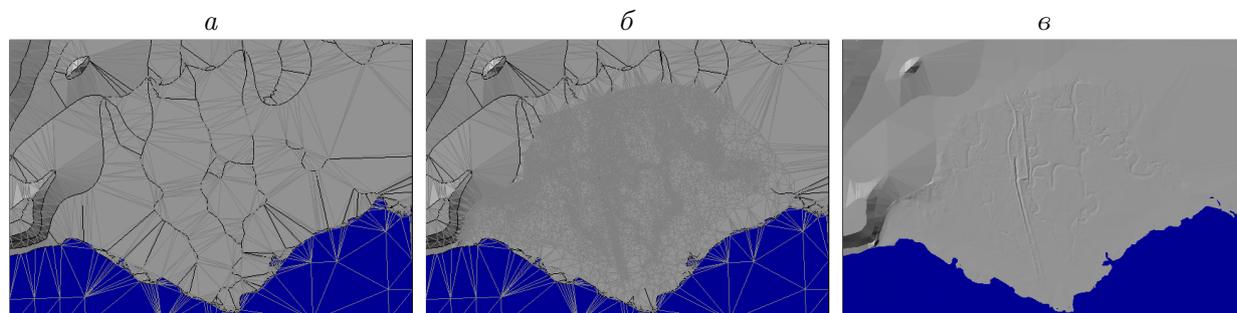


Рис. 5. Замена фрагмента в триангуляции (жесткие ребра показаны черным): *a* — до уточнения; *б* — после замены фрагмента; *в* — после замены фрагмента, ребра не отображаются
Fig. 5. Triangulation fragment replacement (the hard edges are shown in black): *a* — before refinement; *б* — after fragment replacement; *в* — after fragment replacement, hidden edges

```
TrgCmd.exe Set -ny ; ImportTextPoints "%~1" "y ' / ' x ' / ' z" ^
"-PF:.\MSK38\_3a.prj" ; HideBig 10 ; Save "%FN%\%.trg" ; ^
Rasterize "%FN%\%.tif" -sx:0.2 -sy:0.2 "-PF:.\CK95.prj"
```

Рис. 6. Пример командной строки для запуска программы TrgCmd

Fig. 6. An example of the TrgCmd program command line

ние облака точек с шагом 0.8 м (в 10 раз больше исходной плотности точек) оставляет уже всего несколько миллионов точек. По этим точкам уже можно построить триангуляцию, однако она описывает цифровую модель местности, а не рельефа, т. е. содержит точки, полученные по изображениям домов и деревьев.

В используемой фотограмметрической программе Agisoft Metashape реализована классификация точек рельефа по углу наклона треугольников. После применения этого алгоритма с параметрами по умолчанию (15° наклона) остаются в основном точки рельефа. Дальнейшая обработка разреженного и отфильтрованного облака точек выполняется уже рассмотренным для результатов лазерного сканирования способом.

5. Массовая обработка данных в пакетном режиме

Для удобства дальнейшего исследования зон затопления реализован алгоритм получения по триангуляции ее изолиний для заданного списка уровней в виде площадных объектов, которые и являются зонами затоплений при указанных уровнях. Кроме того, площадные изолинии могут быть построены в разностном режиме, при котором вместо исходных площадных объектов создаются разности между такими объектами для соседних уровней, что позволяет определить, какие области будут дополнительно затоплены при подъеме воды в соответствующем диапазоне уровней.

В ходе построения уточненной модели рельефа пришлось многократно обрабатывать данные по нескольким десяткам участков. Такие действия невозможно аккуратно выполнить вручную в программе с графическим пользовательским интерфейсом. Поэтому с применением исходных текстов программы TINSmith была реализована консольная программа TrgCmd, которая может выполнять последовательность команд по обработке триангуляций. На рис. 6 приведен пример последовательности команд TrgCmd, использованный в командных файлах для массовой обработки облаков точек.

Заключение

Таким образом, удалось построить совмещенную с подводной частью модель прибрежного рельефа оз. Байкал, Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской ГЭС, которая была уточнена по результатам ВЛС и АФС на ряде участков. Полученная модель может использоваться как для гидравлического моделирования [6, 7], так и для непосредственного нахождения зон затопления, которые на водоемах с постоянным уровнем (озеро и водохранилище) являются изолиниями этой модели.

При обработке всех исходных данных были использованы триангуляции и ряд алгоритмов для работы с ними. Предложена технология уточнения модели рельефа на отдельных участках, позволяющая получить качественные изолинии рельефа, пригодные для определения затапливаемых и осушаемых при колебаниях уровня воды объектов.

С использованием подготовленных моделей рельефа в рамках научного проекта проведены аналитические работы по определению влияния изменения уровня оз. Байкал на экосистему его мелководной зоны и прибрежных территорий. Определены границы затопления/осушения мелководных зон и прибрежных территорий для оз. Байкал (территорий, расположенных в границах отметок 455.54–457.85 м ТО), Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской ГЭС с выделением отдельных участков по границе Иркутской области в зависимости от уровней озера и расходов через Иркутскую ГЭС. Построены карты зон затопления на основе спутниковых и топографических материалов, подготовлены обзорные схемы с отображением территорий зон затопления/осушения, определены координаты зон затопления для различных уровней озера и расходов через Иркутскую ГЭС.

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 госрегистрации 121030500071-2).

Список литературы

- [1] Карта реки Ангара (лоция). Иркутск: Изд-во Министерства речного флота, Главводпуть; 1974: 48.
 - [2] Карта Иркутского водохранилища. 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., 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. *Journal of Geographical and Environmental Factors and Territorial Development Opportunities*. 2018; 190(1):96–107. DOI:10.1088/1755-1315/190/1/012028.
 - [5] **Бычков И.В., Гаченко А.С., Ружников Г.М., Хмельнов А.Е.** 3-D моделирование русла реки Ангара. Труды международной конференции по “Математическим и информационным технологиям”. Иркутск; 2016: 26–32.
 - [6] **Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S.** High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Journal of Nature*. 2016: 418–422. DOI:10.1038/nature20584.
 - [7] **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 20.05.2022).
-

Algorithms for refining the coastal relief model based on combining of airborne laser scanning and aerial photography data

А. Е. HMELNOV*, А. С. GACHENKO

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

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

Received October 10, 2023, accepted October 17, 2023.

Abstract

The article discusses the experience gained while processing data on the relief of water bodies, such as the Irkutsk reservoir and the Angara River, for establishing a relief model that combines data from various sources, such as topographic and pilot maps, the results of depth measurements with an echo sounder, and the contours of coastal lines obtained from remote sensing data along with aerial photography. The use of algorithms developed for processing such data, which are based on the construction of triangulations, is considered. In addition to the actual algorithm for constructing the Delaunay triangulation with restrictions on vector data of various natures, algorithms have been implemented: removing triangulation artifacts built using relief isolines and morphing maps to coordinate the underwater part of the relief with the surface, replacing a triangulation fragment. The resulting relief model contains all the information about the relief of the studied area and allows it to be used for further hydrological calculations and analysis of the studied areas of reservoirs.

Keywords: coastal topography, coastline model, Delaunay triangulation, flood zones.

Citation: Hmelnov A.E., Gachenko A.S. Algorithms for refining the coastal relief model based on combining of airborne laser scanning and aerial photography data. Computational Technologies. 2023; 28(6):57–67. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.006. (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” (reg. No. 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]. Izdatel'stvo Ministerstva Rechnogo Flota, Glavvodput; 1989. (In Russ.)
3. **Skvortsov A.V.** Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Universiteta; 2002: 128. (In Russ.)
4. **Gachenko A.S., Hmelnov A.E., Hmelnova T.F., Ruginov 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. Journal of 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., Ruginov G.M., Hmelnov A.E.** 3-D modelling of Angara River. Trudy Mezhdunarodnoy Konferentsii po “Matematicheskim i Informatsionnym Tekhnologiyam” (Proceedings of the International Conference of Mathematical and Information Technologies). Irkutsk; 2016: 26–32. (In Russ.)

6. **Pekel J.F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S.** High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Journal of Nature*. 2016: 418–422. DOI:10.1038/nature20584.
7. **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 20.05.2022).