

А.Е. ХМЕЛЬНОВ, А.С. ГАЧЕНКО

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия,  
hmelnov@icc.ru, gachenko@icc.ru

### РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДЛЯ МЕЛКОВОДНЫХ ЗОН И ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ОЗЕРА БАЙКАЛ, ИРКУТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И НИЖНЕГО БЬЕФА ИРКУТСКОЙ ГЭС

*Представлены результаты исследований по разработке цифровых моделей рельефа мелководных зон и прибрежных территорий, подверженных потенциальному ущербу при изменении уровня для отдельных участков, находящихся на берегах озера Байкал, Иркутского водохранилища и Ангары в нижнем бьефе Иркутской ГЭС, необходимых для выполнения проекта по оценке последствий регулирования уровня озера Байкал. При решении задач, учитывающих изменение уровня воды, необходимо использовать комбинированную модель рельефа, сочетающую надводный и подводный рельеф. Рассмотрен опыт, полученный при построении комбинированных моделей рельефа для таких водоемов, как Иркутское и Братское водохранилища, а также озеро Байкал. При построении комбинированной модели учтены все имеющиеся данные о рельефе: топографические и лоцманские карты, результаты замеров глубин с помощью эхолота и контуры береговых линий, выявленные с использованием космических снимков. Для объединения подводного рельефа с надводным разработан ряд алгоритмов, основанных на использовании триангуляции Делоне. Сформирован реестр ключевых участков, для которых необходимо выполнить дополнительный сбор данных по уточнению прибрежного рельефа. Рассмотрена методика получения рельефа при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различных видов: квадрокоптера и БПЛА самолетного типа. В данный момент проводится цифровая аэрофотосъемка и уточняется рельеф на выбранных ключевых участках.*

**Ключевые слова:** *изолинии, триангуляция Делоне с ограничениями, морфинг карт, береговая линия, наводнения, дистанционное зондирование Земли.*

A.E. HMELNOV, A.S. GACHENKO

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 134, Russia,  
hmelnov@icc.ru, gachenko@icc.ru

### DEVELOPMENT OF DIGITAL ELEVATION MODELS FOR SHALLOW-WATER ZONES AND COASTAL AREAS OF LAKE BAIKAL, THE IRKUTSK RESERVOIR AND THE DOWNSTREAM POOL OF IRKUTSK HPP

*In this article we consider the results from developing digital elevation models of shallow-water zones and coastal areas which can be potentially damaged due to changes in water level for particular sites on the shores of Lake Baikal, the Irkutsk reservoir and Angara river in the downstream pool of the Irkutsk hydroelectric power plant, which are needed for implementation of the project to assess the impact of regulation of the water level in Lake Baikal. When solving problems that take into account changes in the water level, it is necessary to use a combined relief model that unites surface and underwater relief. We consider the experience gained in the construction of combined relief models for such water bodies as the Irkutsk and Bratsk reservoirs as well as Lake Baikal. When building the combined relief model we tried to use all available data on the relief: topographic and pilot maps, the results of depth measurements using the echo sounder, and coastline contours identified using satellite images. We have developed several algorithms based on the use of Delaunay triangulation to combine data from various sources. A registry of key areas has been compiled for which it is necessary to perform additional data collection in order to update the coastal relief. We also consider techniques for obtaining digital surface models by using unmanned aerial vehicles of various types: quadcopters and aircraft-type drones. Currently we are carrying out digital aerial photography of selected key areas, where it is required to refine their terrain models.*

**Keywords:** *contour lines, constrained Delaunay triangulation, map morphing, coastline, floods, remote sensing of the Earth.*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время выполняется комплексная научно-исследовательская работа по обоснованию принципов регулирования уровня оз. Байкал в разных условиях водности с учетом современных экологических, социально-экономических и водохозяйственных требований, сопровождаемых сопряженным мониторингом. 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, включая экономические и социальные факторы; подготовки предложений по совершенствованию действующих методик мониторинга уровня и прогнозированию полезного притока воды в оз. Байкал.

Необходимо: определить 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 в границах Республики Бурятия и Иркутской области в зависимости от уровней озера и расходов через Иркутскую ГЭС; построить карты зон затопления на основе спутниковых и топографических материалов; подготовить обзорные схемы с отображением территорий зон затопления/осушения; определить координаты зон затопления для различных уровней озера и расходов через Иркутскую ГЭС.

Для выполнения этих работ требуются качественные цифровые модели рельефа мелководных зон и прибрежных территорий, подверженных потенциальному ущербу при регулировании уровня оз. Байкал, с выделением отдельных участков (для оз. Байкал, Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской ГЭС).

В рамках текущего этапа работ предварительно определены населенные пункты на исследуемой территории и границы их участков, которые могут быть подвержены затоплению. Разработаны обзорные карты исследуемой территории с нанесением участков, подверженных рискам колебания уровня Байкала в диапазоне до 460 м ТО (рис. 1). При этом был получен следующий перечень объектов, попадающих в зоны риска.

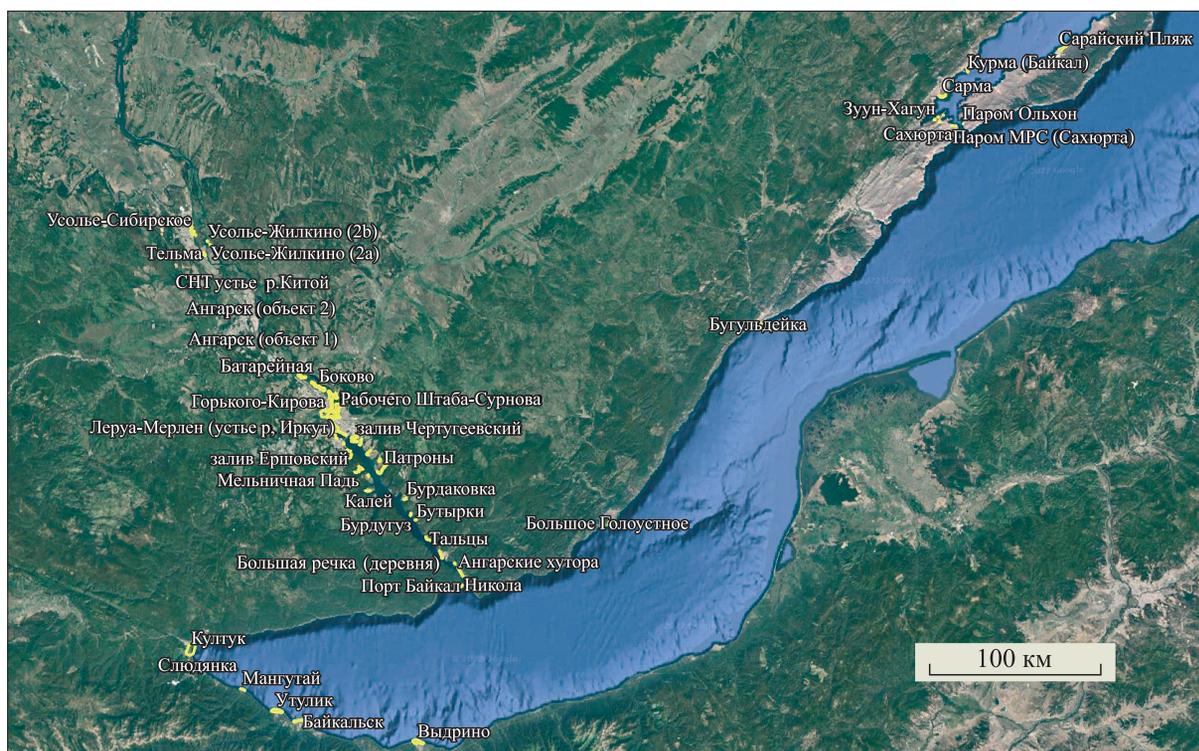


Рис. 1. Обзорная карта (схема) исследуемых площадных объектов (выделены желтыми областями) прибрежных территорий озера Байкал, Иркутского водохранилища и нижнего бьефа Иркутской ГЭС в границах Иркутской области (скриншот рабочей карты из QGIS).

В Иркутской области это:

- Мелководные и подверженные экзогенным процессам и потенциальному ущербу участки прибрежных территорий и населенных пунктов оз. Байкал, в том числе:
  - поселки Хужир, Бугульдейка, Большое Голоустное, с. Сахюрта, рабочие поселки Листвянка, Култук, города Слюдянка, Байкальск;
  - участки побережья Малого моря (дер. Курма – с. Сахюрта), побережья о. Ольхон, участки юго-западного побережья оз. Байкал (г. Слюдянка – порт Байкал, г. Слюдянка – дер. Выдрино).
- Участки ВСЖД (г. Слюдянка – порт Байкал).
- Участки Иркутского водохранилища в границах населенных пунктов, рекреационных и инфраструктурных объектов.
  - Участки нижнего бьефа Иркутской ГЭС, в том числе:
    - от плотины Иркутской ГЭС до Глазковского моста (г. Иркутск);
    - от Глазковского моста (г. Иркутск) до пос. Жилкино;
    - от пос. Жилкино до пос. Боково;
    - от пос. Боково до устья р. Куды;
    - от устья р. Куды до пос. Мегет;
    - от пос. Мегет до о. Грановский (протока Еловая);
    - от о. Грановский (протока Еловая) до г. Ангарск;
    - от о. Лиственничный до о. Большой (г. Ангарск);
    - от о. Большой до устья р. Китой;
    - от устья р. Китой до устья р. Белой.
  - Населенные пункты (города Иркутск, Ангарск), дачные поселки, производственные и социальные объекты, объекты транспорта и инфраструктуры (причалы, водозаборы и др.), объекты непроизводственного назначения, сельского, рыбного и лесного хозяйства.

#### ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПОБАТИМЕТРИИ

Для задач, учитывающих изменение уровня воды, будь то затопление или обмеление, необходимо иметь комбинированную модель, объединяющую информацию о подводном и наземном рельефе. Для такого рода моделей в настоящее время существует специальный термин — топоватиметрия. 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. При этом наиболее сложной задачей, возникающей при построении таких моделей, является получение информации о подводном рельефе.

При реализации проекта по моделированию зон затопления р. Ангары [1–3] был проведен анализ имеющихся сведений о батиметрии и сделан вывод, что среди них лоцманские карты представляют собой наиболее полные источники информации, хотя они очень схематичны. Поэтому был разработан метод преобразования карт, позволяющий комбинировать менее точные схематические данные с более точными топографическими картами [1]. Дальнейшее сравнение полученных таким образом данных с результатами промеров глубины 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. Между тем измерение глубины с помощью эхолота — очень 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.

Другая очень перспективная технология — использование топоватиметрических лидаров [4, 5], которые позволяют строить модель подводного рельефа [6]. В исследовании посредством данного аппарата применяются инфракрасные лазерные лучи, не проникающие в воду, для измерения положения водной поверхности и зеленые лазерные лучи, проходящие через воду, что позволяет измерять расстояние до дна до 1,5–3 глубин 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) позволяет получить максимально большой охват наблюдаемой территории. Разработан ряд методов обработки данных ДЗЗ, дающий возможность 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 требуют использования таких данных дистанционного зондирования, которые невозможно получить бесплатно. Среди рассмотренных здесь 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 используются для отслеживания изменений береговых линий. Например, в [10] изображения оз. Севан со спутника Landsat использовались для долгосрочного (между 1973 и 2015 гг.) отслеживания изменений береговой линии. В обзоре статьи [10] упоминается несколько других исследований по обнаружению водных объектов на снимках и, в частности, работа [11], авторы которой проделали титанический труд по отслеживанию изменений в поверхностных водах всего Земного шара за 32 года с разрешением 30 м/пиксель с использованием 3 млн спутниковых изображений Landsat и специально разработанной экспертной системы для классификации пикселей. Для оценки изменений уже представленных векторными контурами береговых линий Геологическая служба США (USGS) разработала специальный инструмент DSAS [12], 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.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ О РЕЛЬЕФЕ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ

Для создания комбинированных моделей рельефа участков Братского водохранилища нами были использованы следующие источники информации: изолинии рельефа с векторной топоосновы 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 представления модели рельефа использовались триангуляции (нерегулярные триангуляционные сети, TIN — Triangular Irregular Network) — одна из основных структур данных ГИС [9]. Для работы с ними применялась собственная разработка — библиотека для построения и обработки триангуляций Делоне и триангуляций Делоне с ограничениями [2], которая является быстрой, надежной и может обрабатывать большие наборы данных. Для повышения качества моделей рельефа, построенных с использованием горизонталей топоосновы, был 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.

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

Информация о рельефе местности находится в различных источниках и сравнительно легко доступна. Данные SRTM имеют широкое покрытие, но их разрешение (30 м на пиксель) слишком низкое, чтобы можно было получить требуемую точность оценок уровня воды. Данные ASTER также имеют разрешение 30 м на пиксель, при этом в Иркутской области они содержат многочисленные неточности, и в целом их качество значительно хуже. Высококачественная (10 м на пиксель) модель рельефа WorldDEM [13] имеется в продаже, но к моменту запуска проекта минимальный размер заказа составлял 500 км<sup>2</sup> (цена превысила бы значительную часть бюджета проекта).

В результате был сделан выбор в пользу применения имеющихся векторных топографических карт в масштабе 1:50 000, которые имеются для всей рассматриваемой территории, а на отдельных участках — в масштабе 1:25 000. Векторные карты содержат достаточно точное представление береговых линий, что позволяет использовать технику морфинга карты для совмещения подводных данных с надводным рельефом [1, 2]. Основные недостатки имеющихся топографических карт — большое сечение рельефа (20 м для любых открытых карт), не всегда актуальное состояние местности (иногда исследования датируются 2000 г.) и наличие ошибок, проявляющихся при сравнении с космическими снимками. Несмотря на эти недостатки, топооснова оказалась лучшим из доступных источников 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 оригинальный алгоритм. Кроме того, алгоритм построения модели рельефа по векторным данным позволяет задавать несколько различных ролей для используемых векторных слоев: «изолинии рельефа», «отметки высот», «отметки уреза воды», «изобаты», «отметки глубин», «прочие водные объекты», «озера», «потоки», «внешний контур». Построение модели выполняется в несколько этапов обработки соответствующих им видов слоев. При наличии «отметок уреза воды» по ним 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 которым 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 артефакты в тех распадах, где они протекают.

В отличие от наземного рельефа, очень проблематично найти какую-либо информацию о подводном рельефе. В начале работ была надежда на старые топографические карты района Братского водохранилища до его затопления. Это позволило бы получить некоторую информацию о подводном рельефе, который был наземным на момент создания карт. К сожалению, позднее выяснилось, что топографическая карта Иркутской области впервые была создана в 1970-х гг., тогда как наполнение ложа Братского водохранилища началось в 1961 г., поэтому карты с рельефом ложа водохранилища до затопления не существует. Правда, на отдельных трапециях присутствуют именно изолинии рельефа (а не изобаты) на некоторых участках Братского водохранилища.

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

Для получения векторного представления о рельефе были отсканированы и векторизованы бумажные листы лоций с помощью программы EasyTrace 7.99. Результатом этого стали карты в формате Shape. Листы данных карт ориентированы произвольно, поэтому требуется выполнение преобразования координат, чтобы совместить эти карты с топоосновой. Для поиска параметров такого преобразования координат используется метод наименьших квадратов, требующий списка пар характерных точек, присутствующих на обеих картах.

После поворота и сдвига совпадение топографической и лоцманской карт все равно не будет идеальным, поскольку лоцманская очень схематична. Но так как обе карты содержат изображения береговых линий, их можно попытаться сопоставить.

С этой целью были разработаны технология и программное обеспечение для морфинга карт, которое позволяет задавать соответствия между точками линий двух карт и, в результате, получать преобразование неточной карты, перемещающее все ее точки в более правильные положения. 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, куда эта точка попадает [1, 2, 9]. 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].

Реальное состояние подводного рельефа в ряде интересующих районов было 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.

## УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Для обеспечения проекта дополнительными данными и уточнения моделей рельефа прибрежной территории на ключевых участках в данный момент проводится цифровая аэрофотосъемка (АФС) с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Для этого используется квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro и беспилотный комплекс самолетного типа для аэрофотосъемки Геоскан 101. АФС проводилась с высоты 100, 153 и 220 м. Получаемые в результате съемки изображения позволяют при помощи специализированного программного обеспечения (Agisoft Metashape PRO [14]) создавать ортофотопланы и 3D модели рельефа (ЦММ — цифровые модели местности) с точностью выше 10 см на пиксель, что приблизительно соответствует масштабу топографического плана масштаба 1:1000. При проведении АФС обеспечивалось продольное и поперечное перекрытие снимков около 70 % для обеспечения качественного построения 3D модели, при этом каждый полет производился отрезками — галсами по длине и ширине участка. Полетные маршруты БПЛА в автоматическом режиме строились с использованием приложения PIX4Dcapture (для квадрокоптера DJI Mavic 2 Pro) (рис. 2) и ПО Геоскан (для БПЛА самолетного типа).

В результате обследования нескольких ключевых участков различными типами БПЛА был сделан вывод о том, что для территорий площадью от нескольких десятков гектаров целесообразнее использовать аппараты самолетного типа. Так, для обследования ключевого участка, представленного на рис. 2, пришлось выполнить четыре полета квадрокоптера. Общая площадь съемки при этом составила 0,36 км<sup>2</sup>, а время полета на четырех аккумуляторах — 1 ч. При этом были разряжены все имеющиеся аккумуляторы, а зарядка каждого из них требует около 1,5 ч, поэтому следующая съемка такого объема может быть выполнена не ранее, чем через 6 ч, поскольку зарядное устройство, хотя и позволяет подключить сразу все четыре аккумулятора, но может заряжать их только последовательно, из-за ограничений мощности. Таким образом, даже при наличии поблизости источников электроэнергии за сутки с использованием квадрокоптера вряд ли получится обследовать более двух таких участков, а время съемки территории площадью несколько квадратных километров будет измеряться неделями.

При обследовании другого ключевого участка (рис. 3) площадью 1 км<sup>2</sup> при помощи БПЛА самолетного типа Геоскан 101 время полета составило около 50 мин, при этом был разряжен только один аккумулятор. К минусам использования БПЛА самолетного типа можно отнести более продолжительное время подготовки к полету и то, что при облете узких участков короткими поперечными галсами больше половины времени полета будет затрачено на развороты между ними. Также возможно появление размытости на некоторых изображениях при наличии воздушных потоков.

Методы построения итоговых данных базируются на принципах фотограмметрии. Этот метод в простейшем случае сопоставляет пространственные координаты точек объекта, которые определяются путем измерений, выполняемых по двум или более фотографиям, снятым из разных положений. При этом на каждом изображении отыскиваются общие точки. Затем луч зрения проводится от местоположения фотоаппарата до точки на объекте. Пересечение этих лучей и определяет расположение точки в пространстве.

Отсутствие в БПЛА высокоточного геодезического GNSS-приемника потребовало дополнительной привязки ключевых участков. Для этого на местности устанавливалась сеть опознаков. В качестве опознаков использовались белые квадраты и характерные ярко выраженные естественные точки на местности. Планово-высотная привязка опознаков производилась при помощи GNSS-приемников (использовался геодезический приемник EFT M1) с привязкой к пунктам государственной геодезической сети.

В результате обработки аэрофотоснимков в ПО Agisoft Metashape Professional получены цифровые модели местности (ЦММ) и ортофотопланы. Методология АФС с использованием БПЛА является общепринятой за счет доступной цены при полевых работах и эффективна при построении и уточнении моделей рельефа на ряде ключевых участков.

В ходе подготовительной экспедиции был поставлен достаточно показательный эксперимент, изначальной целью которого было сравнение качества результатов, получаемых при разной высоте съемки: для двух полетов, выполненных в один день на разных высотах (153 и 220 м), не дожидаясь завершения обработки геодезических измерений, были независимо построены ортофотопланы и ЦММ без использования опознаков. Хотя оба полета были выполнены непосредственно друг за другом с интервалом около 1 ч, полученные ЦММ имеют существенное относительное смещение по горизонтали. Была сделана попытка скомпенсировать это смещение сдвигом растра. При этом совмещение растров выполнялось для фрагмента территории в восточной части изображения, где расположены



Рис. 2. Полетные планы (схема) съемки ключевого участка (фрагмент Иркутского водохранилища) при помощи БПЛА DJI Mavic 2 Pro с высоты 100 м в интерфейсе программы Pix4Dcapture.



Рис. 3. Ортофотоплан фрагмента местности в районе Иркутского водохранилища, съемка БПЛА с высоты 220 м.

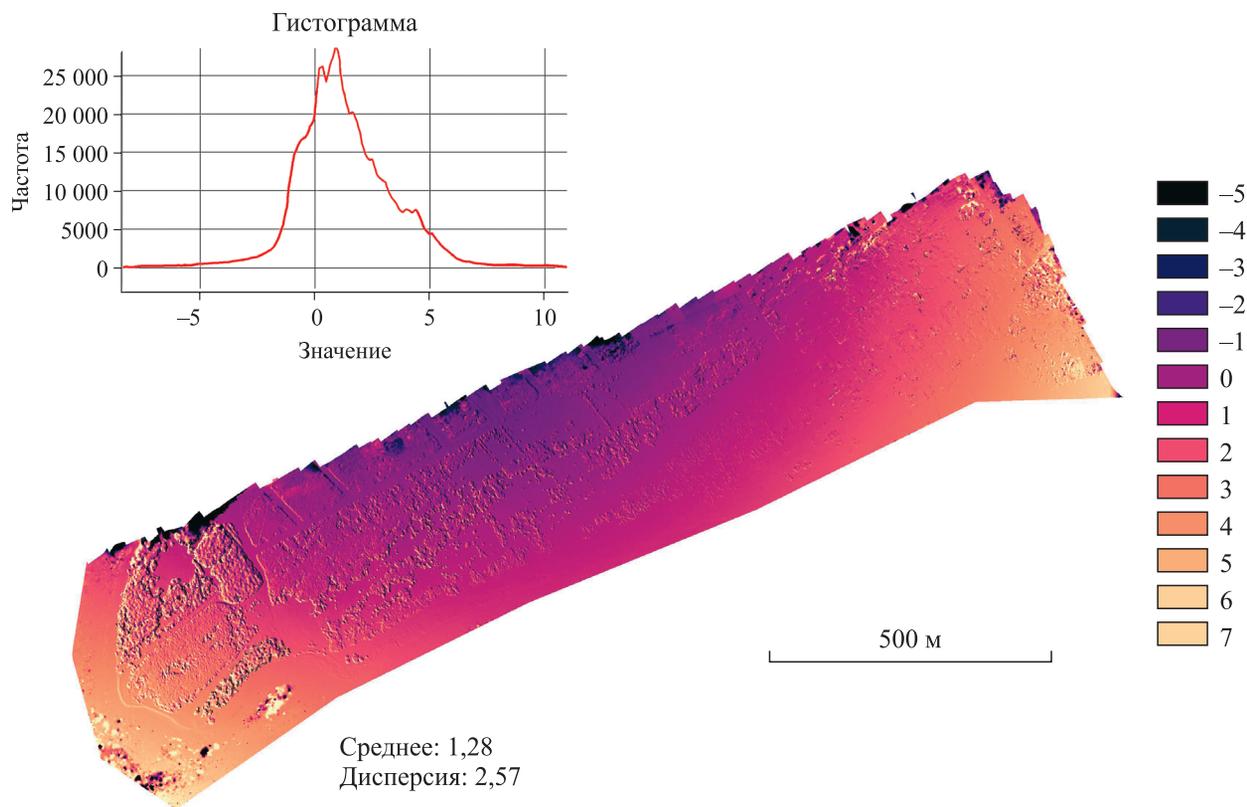


Рис. 4. Разность двух моделей рельефа и ее гистограмма.

здания (см. рис. 3), для чего пришлось сделать сдвиг растра, снятого с высоты 220 м, на вектор (0,77–3,19 м). В результате в той области, по которой выбирали сдвиг, получилось очень хорошее соответствие, при котором переключение между разными растрами ЦММ почти не заметно. Однако при этом в западной части с лесными участками наблюдается сдвиг на восток (точнее, в направлении длины исследуемой области) около 2 м у ЦММ для полета на высоте 220 м (все полученные контуры лесных массивов также очень похожи на двух снимках). Таким образом, в горизонтальной плоскости произошло сжатие по длине модели местности на величину около 2 м.

Далее (уже после сдвига) была вычислена разность двух растров (рис. 4). Помимо хорошо заметных контуров лесных массивов в западной части, появление которых объясняется вышеупомянутым сжатием в горизонтальной плоскости, на рисунке видна общая для всех пикселей тенденция, вызванная различиями в степени прогиба двух полученных моделей местности, в основном в направлении их длины: по краям области разность ЦММ по высоте составляет около +3 м, а в средней части — от +1 м на юге до –1 м на севере.

Выполненный эксперимент показывает, что при применении на БПЛА ГНС-приемника бытового уровня (не двухчастотного) без использования геодезической привязки погрешность получаемых моделей местности будет составлять несколько метров во всех направлениях, причем это может быть не общая для всех пикселей систематическая погрешность, а сжатие/растяжение и изгиб всей модели, которые будет невозможно компенсировать простыми преобразованиями.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа большого объема исходной информации о надводном и подводном рельефах получены выводы о том, какими данными лучше пользоваться в рамках выполнения данных работ. Проведены комплексные работы по получению набора совмещенных 3D моделей рельефа для ряда водных объектов и их участков (Иркутское водохранилище, Братское водохранилище, пос. Листвянка (фрагменты оз. Байкал)). Получена комплексная модель совмещенного рельефа на протяжении от ГЭС в г. Иркутске до впадения р. Белой в Ангару (протяженность порядка 132 км). Разработана оригинальная технология [1, 2] сопряжения надводного рельефа с подводным.

Показана необходимость использования БПЛА самолетного типа для съемки участков местности большой площади. Выполнена съемка с использованием БПЛА различных типов ряда исследуемых территорий и выбраны методы съемки и последующей обработки, позволяющие достичь желаемой точности получаемых моделей местности благодаря тому, что к работам был привлечен геодезист с высокоточным GNSS-приемником.

Аналогичные работы (в рамках совместного проекта) выполняются коллегами из Республики Бурятия по восточному берегу оз. Байкал. В результате совместных консультаций сделан вывод, что применение БПЛА (обработки съемки на основе принципа фотограмметрии), а также использование данных, которые получены при помощи лидарной съемки, позволяют получить модель прибрежной территории Байкальской природной территории на ключевых участках и решить поставленные задачи: построить карты зон затопления на основе спутниковых и топографических материалов, подготовить обзорные схемы с отображением территорий зон затопления/осушения и определить координаты зон затопления для различных уровней озера и расходов через Иркутскую ГЭС.

В работе авторами показана технологическая цепочка, которая позволяет решать актуальные наукоемкие задачи и в дальнейшем применять ее на различные территории.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант 075-15-2020-787 на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Buchkov I., Gachenko A., Ruginov G., Hmelnov A.** 3-D modeling of Angara riverbed // CEUR Workshop Proceedings. — 2017. — Vol. 1839. — P. 26–32.
2. **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 // IOP Conference Series: Earth Environmental Science. — 2018. — Vol. 190. — P. 012028.
3. **Gubin N.A., Grigorev K.A., Poletaev A.S., Chensky A.G.** Combined hydroacoustic research of Lake Baikal // Journ. Phys.: Conf. Ser. — 2021. — Vol. 97. — P. 1728 012005.
4. **Ramnath V., Feygels V., Kalluri H., Smith B.** CZMIL (Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar) bathymetric performance in diverse littoral zones // OCEANS. — 2015. — N 5. — P. 1–10.
5. **Glukhov V., Goldin Yu., Rodionov M.A.** Airborne LIDAR bathymetry of coastal areas at high flight altitude // Fundamental and Applied Hydrophysics. — 2019. — Vol. 12. — P. 85–93.
6. **Карта** Братского водохранилища / Под ред. Е.М. Поповой. — Иркутск: Изд-во Мин. речного флота, Главводпуть, 1974. — 48 с.
7. **Salameh E., Frappart F., Almar R., Baptista P., Heygster G., Lubac B., Raucoules D., Almeida L., Capo S., Idier D., Li Z., Marieu V., Poupardin A., Paulo A., Turki I., Laignel B.** Monitoring beach topography and nearshore bathymetry using spaceborne remote sensing: A review // Remote Sensing. — 2019. — Vol. 11 (19). — P. 2212.
8. **Алексеев А.Г., Зубченко Э.С.** Современная технология спутниковой батиметрии // Навигация и гидрография. — 2014. — Т. 37. — С. 73–81.
9. **Скворцов А.В.** Триангуляция Делоне и ее применение. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2002. — 128 с.
10. **Novsepyan A., Teranosyan G., Muradyan V., Asmaryan S., Medvedev A., Koshkarev A.** Lake Sevan shoreline change assessment using multi-temporal landsat images // Geography, Environment, Sustainability. — 2019. — Vol. 2, N 4. — P. 212–229.
11. **Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S.** High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. — 2016. — Vol. 540. — P. 418–422.
12. **Himmelstoss E.A., Farris A.S., Henderson R.E., Kratzmann M.G., Ergul A., Zhang O., Zichichi J.L., Thierer E.R.** Digital Shoreline Analysis System (version 5.0): U.S. Geological Survey software release, 2018. [Электронный ресурс]. — <https://code.usgs.gov/cch/dsas> (дата обращения 20.05.2022).
13. **Airbus** Defence and Space Elevation models [Электронный ресурс]. — <http://www.intelligence-airbusds.com/elevation-models> (дата обращения 23.03.2020).
14. **Руководство** пользователя Agisoft Metashape: Professional Edition [Электронный ресурс]. — [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_5\\_ru.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_ru.pdf) (дата обращения 15.02.2021).

*Поступила в редакцию 12.07.2022*

*После доработки 13.08.2022*

*Принята к публикации 03.10.2022*