

А.В. КАЗАКОВ*, ******, **Е.Е. КОНОНОВ****, **О.М. ХЛЫСТОВ***, **А.Р. БАТУЕВ****

*Лимнологический институт СО РАН,

664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия, oleg@lin.irk.ru

**Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, kazakov.gis@gmail.com, kononov@lin.irk.ru, arbatuev.irk@yandex.ru

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К КАРТИРОВАНИЮ РЕЛЬЕФА ДОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ПОБЕРЕЖЬЯ ВОДНОГО БАСЕЙНА НА ПРИМЕРЕ ПЕСЧАНОГО СЕГМЕНТА ЮЖНОГО БАЙКАЛА

Рассматривается методика поэтапной обработки батиметрических материалов, полученных с помощью высоко-разрешающего многолучевого эхолотирования и данных дистанционного зондирования Земли, которая базируется на применении современных ГИС-технологий с целью создания цифровой модели рельефа, объединяющей дно и побережье Песчаного сегмента Южного Байкала. Предлагаемый алгоритм создания цифровой модели рельефа позволяет добиться приемлемого качества визуализации новых батиметрических данных для выявления мелких деталей рельефа, не доступных ранее из-за низкого разрешения съемки дна и последующей обработки данных. Показано, как на основе анализа построенной цифровой модели описываются морфологические особенности донной поверхности Песчаного сегмента. Проведенный анализ позволил оценить роль эндо- и экзогенных факторов в создании наиболее заметных форм донно-склонового рельефа. Выявлено, что подводно-гравитационными процессами созданы широко развитые грядово-овражные формы свала глубин авандельт. Подводный склон западного борта сегмента в геоморфологическом отношении довольно однообразен — доминируют абразионные, тектогенно обусловленные круто падающие поверхности.

Ключевые слова: многолучевые эхолоты, батиметрия, методика, цифровая модель рельефа, геологические процессы.

A.V. KAZAKOV*, ******, **E.E. KONONOV****, **O.M. KHLYSTOV***, **A.R. BATUEV****

*Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,

664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia, oleg@lin.irk.ru

**V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, kazakov.gis@gmail.com, kononov@lin.irk.ru, arbatuev.irk@yandex.ru

NEW APPROACHES TO MAPPING THE RELIEF OF THE BOTTOM SURFACE AND COAST OF THE WATER BASIN AS EXEMPLIFIED BY THE PESCHANYI SEGMENT OF SOUTH BAIKAL

We examine the technique of phased processing of bathymetric material obtained by means of high resolution multibeam echo sounding and Earth remote sensing data, based on using advanced GIS technologies, with the purpose of developing the digital elevation model that combines the bottom and coast of the Peschanyi (Sandy) segment of South Baikal. The suggested algorithm of developing the digital elevation model makes it possible to achieve an acceptable visualization quality of new bathymetric data in order to identify small topographic features not accessible previously because of low survey resolution of the bottom and subsequent data processing. It is shown how on the basis of analyzing the resulting digital model the morphological characteristics of the bottom surface of the Peschanyi segment are described. The analysis permitted us to assess the role of the endo- and exogenous factors in the creation of the most clearly pronounced forms of the bottom-slope relief. It was found that the subaquatic-gravitational processes produced widely occurring ridge-gully forms of the depth dump of the delta-fronts. Geomorphologically, the underwater slope of the western side of the segment is relatively uniform; it is dominated by abrasion, tectogenically-caused steeply inclined surfaces.

Keywords: multibeam echosounders, bathymetry, technique, digital elevation model, geological processes.

ВВЕДЕНИЕ

Продолжительное время представление о рельефе дна оз. Байкал было отображено только карта-ми мелкого масштаба, что не позволяло детально исследовать морфологию донных форм рельефа или

фиксировать их наличие на донной поверхности [1–5]. В настоящее время максимально крупномасштабная — это цифровая батиметрическая карта проекта ИНТАС (м-б ~1:100 000), опубликованная в 2002 г. Она представляет собой уточнение выпущенной в 1992 г. «Батиметрической карты акватории озера Байкал» (м-б 1:200 000), выполненной ГУНИО Министерства обороны СССР в период с 1969 по 1988 г. [2, 3].

Достоверное и детальное изучение рельефа донной поверхности невозможно без создания его цифровой модели. Корректно построенная цифровая модель рельефа (ЦМР) позволяет с высокой точностью проводить комплексный морфометрический анализ, понимать результаты экзо- и эндогенных процессов, может служить основой для любого вида топо-батиметрического и тематического картирования.

Один из главных инструментов для получения высокодетальных батиметрических данных представляют собой многолучевые эхолоты (МЛЭ). Впервые съемки донной поверхности Байкала с применением МЛЭ были проведены в 2009 г. сотрудниками Лимнологического института СО РАН (ЛИН СО РАН), которые совместно с бельгийскими коллегами организовали детальные съемки дна озера с использованием мобильной системы многолучевого комплекса «ELAC SeaBeam1050», а позже, совместно с японскими коллегами и сотрудниками Иркутского национального исследовательского технического университета, с применением МЛЭ «Kongsberg EM710S».

Использование новых технологий и оборудования создало проблемы, связанные со сложной спецификой обработки полученных данных МЛЭ для создания корректной ЦМР донной поверхности озера. Цель данной работы — изложить методику поэтапной обработки батиметрического материала, базирующуюся на применении современных ГИС-технологий, и показать результаты применения созданной модели для изучения рельефа и геодинамических процессов донной поверхности Песчаного сегмента Южного Байкала. Морфологически сегмент выглядит как узкая котловина, протягивающаяся на север между свалом глубин дельты р. Селенги на востоке и западным бортом Байкальской впадины. Общая протяженность сегмента около 90 км, ширина 10–13 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Систематизация данных съемки МЛЭ в ГИС. Полученные массивы батиметрических данных нуждались в четкой систематизации на уровне базы данных (БД) в геоинформационной системе. Для реализации этой цели была выбрана разработанная в лаборатории геологии оз. Байкала ЛИН СО РАН ГИС «GIS of Baikal», которая представляет собой среду для сбора, хранения и анализа пространственных данных, объединяет разные типы информации, собранные за многие годы исследований по всей акватории оз. Байкал. В ходе систематизации данных МЛЭ в ГИС был проведен их детальный анализ и решены проблемы, связанные с их разбросанностью и несогласованностью, а именно: удалены промежуточные (мусорные) данные; архивированы первичные данные съемки; сделана оценка качества интерпретируемых поверхностей съемки на основе выполнения анализа базовых параметров определения скорости звука гидроакустических лучей, испускаемых МЛЭ к видимому информативному горизонту поверхности дна; проведена типизация съемок с разделением их по иерархическим категориям с привязкой к основному набору метаданных, таких как марки МЛЭ, год съемки, диапазон глубин, качество первичного облака точек и т. д. Все съемки были приведены к единому формату (файл формата XYZ) с выполнением пересчета к единой системе координат (UTMzone 48N / EPSG-32648) и локальной системе высот оз. Байкал. Осуществлена систематизация всех данных во внешней БД с подключением ее к ГИС. Благодаря такому подходу в БД «GIS of Baikal» был сформирован логически организованный кластер данных, содержащий проработанную и стандартизированную в едином ключе первичную информацию по выполненным на озере МЛЭ-съемкам. Далее на основе этих данных была построена общая обзорная карта покрытия МЛЭ-съемкой дна акватории озера, сформирована единая картина, описывающая масштаб и качество полученных данных. Проведение такого первичного анализа помогло выстроить дальнейший алгоритм по созданию единой корректной ЦМР донной поверхности.

Подбор метода интерполяции с определением оптимального шага сетки для создания единой ЦМР всей акватории. В работе мы применили метод линейной интерполяции по растровой сетке высот (DEM), основанной на триангуляции Делоне. При достаточной простоте данный метод позволяет получить поверхность, сопоставимую с созданной более сложными методами, такими как кригинг, радиальная базисная функция или метод минимальной кривизны.

Одно из важнейших условий при создании DEM-поверхности — это правильное определение ее пространственного разрешения (линейных размеров шага сетки). Было установлено, что плотность

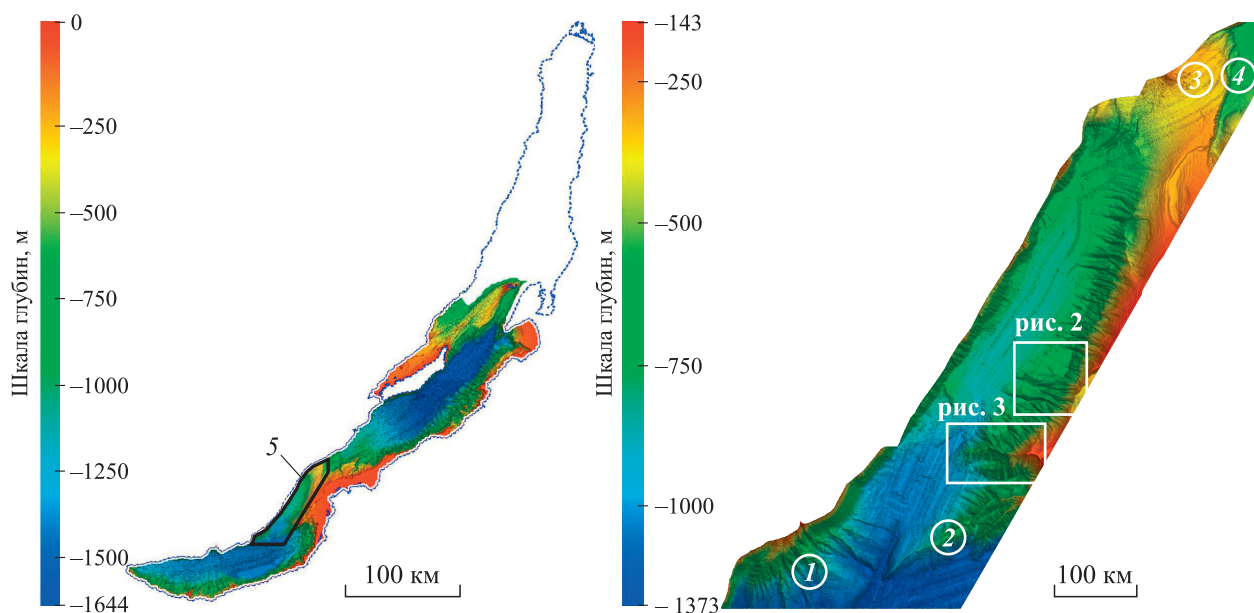


Рис. 1. Цифровая модель рельефа донной поверхности Песчаного сегмента оз. Байкал, построенная на основе ИНТАС и съемок МЛЭ.

1 — дельта р. Голоустной; 2 — Посольская банка; 3 — дельта р. Бугульдейки; 4 — Хараузский тектогенный уступ. 5 — граница Песчаного сегмента.

точек в съемках, полученных в разные годы, носит не совсем тождественный характер, так как съемки выполнялись разными марками МЛЭ с разной калибровкой и настройкой. В этой связи плотность точек в них сильно варьирует — от 2 до 80 м. По этой причине шаг сетки приходится выбирать в соответствии с элементами поверхности с наибольшим градиентом, т. е. где требуется мелкий шаг. В этом случае такой же мелкий шаг устанавливается и для областей с небольшим градиентом, где для достижения хорошей точности было бы достаточно и более крупного шага. Оптимальный выход из данной противоречивой ситуации — это создание ряда поверхностей, одной из которых будет общая с вычисленным из целого массива данных усредненным шагом сетки, и формирование поверхностей с привязкой к году съемки с шагом сетки, вычисленным конкретно от их собственной плотности точек.

Наибольшую площадь всей ЦМР занимает съемка, выполненная в 2009 г. Для построения единой ЦМР был выбран шаг сетки, равный 30×30 м. Согласно стандарту ЦМР Геологической службы США [6], ЦМР с регулярным массивом высотных отметок в узле решетки 30×30 м оценивается равной карте масштаба 1:25 000. Данная классификация хорошо подходит под рассчитанный нами диапазон и в целом удовлетворяет требованиям к точности создаваемой модели, которая будет превышать существующие картографические материалы. Она должна позволить максимально сохранить даже мелкие морфологические структуры и в целом будет не слишком тяжела для дальнейшего расчета различных морфометрических показателей.

После определения входных параметров для создания ЦМР исходные облака точек массивами, разбитыми по квадратам размером 2×2 км, были импортированы в ПО Global Mapper v.20, где после применения вышеописанного метода интерполяции получена общая ЦМР донной поверхности с разрешением сетки 30×30 м (рис. 1), а также созданы отдельные поверхности по каждому году съемки с максимально доступным для каждого разрешением.

Применение фильтров адаптивного сглаживания. ЦМР в исходном виде содержит большой спектр различных морфологических ошибок и артефактов, которые обнаруживаются при визуальном анализе. Это связано, в первую очередь, с тем, что данные, полученные с МЛЭ на этапе их постобработки, проходят процедуру фильтрации полностью за счет автоматизированных алгоритмов (CUBE и SpikeFilter, реализованные в QSN Qimage). Таким методом чистки, учитывая сложность рельефа донной поверхности озера, трудно добиться полной корректности полученных данных, отвечающих всем требованиям правильной структурной и топологической достоверности, необходимой для создания корректной ЦМР. Для данных эхолокационной съемки характерен следующий набор ошибок разной

направленности: зашумленность данных; «швы Франкенштейна»; избыточность полученной информации; проблема общей несогласованности данных съемок МЛЭ [5].

Для искоренения указанных выше артефактов и создания структурно достоверной модели предложена специально разработанная методика «чистки» ЦМР, основанная на поэтапном применении различных алгоритмов адаптивного сглаживания. На примере выбранного модельного полигона съемки МЛЭ 2009 г. в районе Песчаного сегмента (см. рис. 1) мы рассмотрим применение этой методики.

На приведенных изображениях донной поверхности выделены зоны с локальными впадинами. Впадина может состоять из одной или группы смежных ячеек с одинаковым значением высоты, которое меньше значения окружающих ячеек. В качестве впадин могут выступать как элементы естественного рельефа, так и ложные впадины — это недостатки цифровой модели.

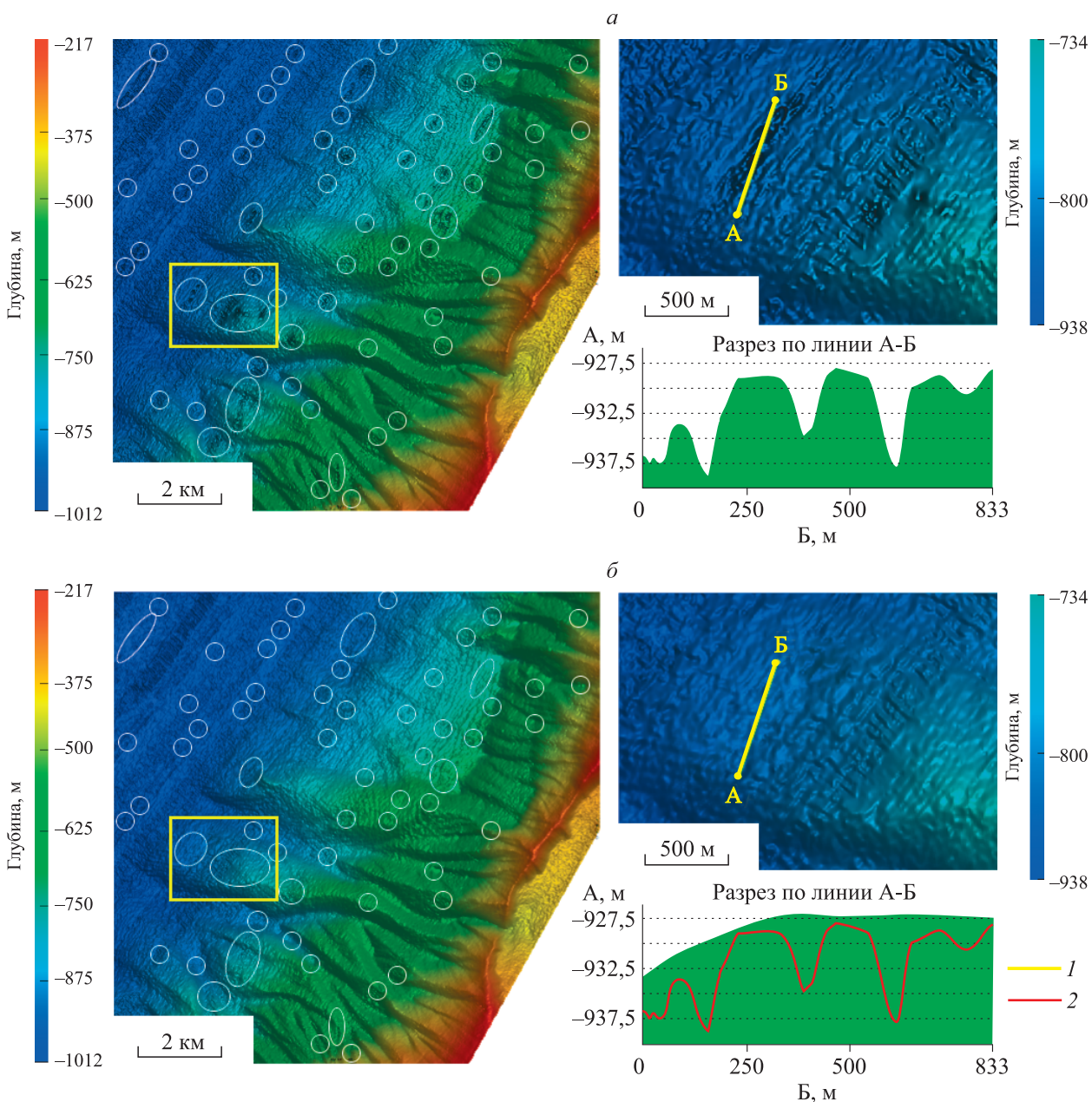


Рис. 2. Результат работы модуля FillSinks (по [8]) до (а) и после обработки (б).

1 — линия поперечного профиля на поверхности дна; 2 — линия профиля поверхности дна в разрезе до обработки.

Их наличие обусловлено ошибками входных данных, ошибками интерполяции в процессе генерации цифровой модели, округления интерполированных значений, усреднения значений высоты [7]. Эффективные методы устранения впадин разработаны L. Wang и H. Liu [7] и O. Planchon и F. Darboux [8]. Оба метода реализованы в SAGA GIS в виде соответствующих модулей FillSinks. Для заполнения впадин в нашей модели был применен метод Planchon/Darboux [8] как наиболее быстро выполняющий процесс обработки больших наборов данных по сравнению с другими методами (рис. 2). На исходной модели также видны аномальные выбросы в виде шипов/пиков. Для их чистки применен модуль, который основан на предположении о том, что большая разность высот между двумя соседними ячейками вряд ли является крутым склоном, скорее, ошибкой в данных. Вероятность того что ячейка с большими значениями высот не ошибочна, увеличивается пропорционально расстоянию между двумя рассматриваемыми ячейками, поэтому допустимая разность высот рассчитывается с помощью функции от этого расстояния. Ячейка считается верной, если в пределах плавающего окна не встретится другая ячейка, разность высоты которой с высотой рассматриваемой ячейки не будет превышать допустимую разность [9]. С помощью модуля DTM Filter были устранены почти 90 % ошибок, связанных с аномальными выбросами.

На исходной модели присутствуют общая зашумленность данных и шероховатость. Связано это, прежде всего, с избыточностью исходных точек при интерполяции. Идеальный фильтр для чистки зашумленных данных — это метод сглаживания Mesh Denoise, разработанный специально для обработки объемных топографических данных [10]. Суть метода заключается в контроле двух параметров, влияющих на фильтр понижения уровня шума: порога T , контролирующего четкость функций, и показателя n , задающего число итераций. Оптимальные настройки зависят от характера рельефа и шума, который требуется удалить (рис. 3).

На последнем этапе чистки устранялись или минимизировались так называемые швы Франкенштейна. Данная ошибка возникает в области перекрытия смежных галсов съемки, в краевых частях которых существуют максимальные искажения и потери сигнала при сборе данных. Особенно заметны такие швы на абиссальных равнинах [11]. Для удаления швов в ЦМР был написан сценарий на языке программирования Python, который позволяет на основе обычного стандартного отклонения и коэффициента усреднения полностью избавляться от данных артефактов. В результате проведенной комплексной коррекции была получена финальная модель поверхности дна.

Следующий этап — объединение полученной ЦМР дна с рельефом побережья в единое целое для создания бесшовной цифровой поверхности. Для достижения этой цели в качестве модели, описывающей существующий рельеф побережья, использована глобальная ЦМР Airbus World DEM, полученная на основе дистанционного зондирования Земли от компании Airbus Defence and Space [12]. В прибрежных зонах и на мелководье съемки МЛЭ не проводились в силу специфики работы оборудования, и поэтому для заполнения разрывов данными между выбранной поверхностью суши и поверхностью озера было решено использовать и оцифровывать батиметрические карты с бумажного Атласа оз. Бай-

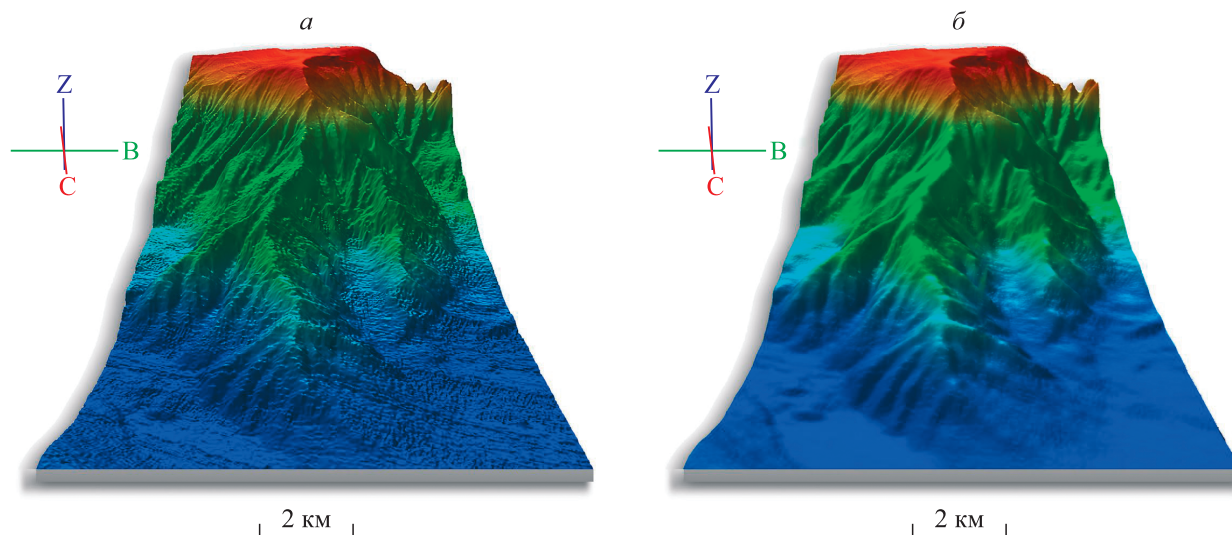


Рис. 3. Донная поверхность до (а) и после (б) работы фильтра адаптивного сглаживания Mesh Denoise.

кал № 65064 [13], совмещая их с данными проекта ИНТАС [3]. При выполнении этих работ одной из основных проблем была необходимость привести все описанные данные к принятой единой системе высот. В особенности это касалось принятой в работу ЦМР суши (Airbus World DEM), так как в исходном формате отсчет ее высот привязан к эллипсоиду WGS-84. Данную задачу удалось решить следующим способом. При первичной загрузке ЦМР в ГИС было выявлено, что она также включает в себя отметки поверхности зеркала озера, высотный уровень которых по всей площади акватории равен 449 м. Поэтому приведение модели суши к системе высот акватории озера было выполнено за счет понижения ее на 449 м. Для этого использовался растровый калькулятор,вшитый в пакет инструментов Spatial Analyst геоинформационной оболочки ArcGIS Desktop v. 10.8. Батиметрические отметки с Атласа оз. Байкала № 65064 [13] и по проекту ИНТАС [3] приводить к единому виду не потребовалось, так как весь проект по обработке заранее выполнялся в однородной системе высот со специальным прицелом в сторону запланированного их будущего совмещения и анализа. После успешного приведения всех данных к единой системе высот была проведена процедура их интерполяции (методом триангуляции с линейной интерполяцией) и создана единая ЦМР дна и побережья.

Анализ ЦМР позволил получить новые детальные данные по рельефу донной поверхности сегмента. Были тщательно исследованы свал глубин авандельты р. Селенги, абиссальная поверхность и борта сегмента. Установлено, что поверхность свала осложнена грядово-овражными формами рельефа. Овраги имеют V-образный профиль с глубиной расчленения до 250 м. Западный борт сегмента очень крутой, доминируют абразионные, тектогенно обусловленные поверхности. Вдоль этого борта изучена веерообразная дельта р. Голоустной и дельта р. Бугульдейки, имеющая выпуклую в поперечном разрезе форму шириной около 6,5–7 км. В целом батиметрические отметки донной поверхности сегмента уменьшаются по мере перемещения с юга на север. Напротив устья р. Голоустной названная поверхность имеет отметки 1350–1400 м, а напротив устья р. Бугульдейки — около 600 м. Подъем донной поверхности завершается прямолинейным тектогенным Хараузским уступом, пересекающим сегмент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная комплексная и многоступенчатая методика обработки новых высокоразрешающих батиметрических данных, полученных с небольшим перекрытием полосы съемки между галсами (10–15 %), позволила более корректно и качественно представить их в виде карт и ЦМР и состоит из следующих последовательных методических и технологических компонентов: системной организации данных съемки МЛЭ в ГИС; подбора метода интерполяции с определением оптимального шага сетки для создания единой ЦМР всей акватории; применения фильтров адаптивного сглаживания; технологии объединения полученной ЦМР дна с рельефом побережья, основанных на данных ДЗЗ, в единое целое. Методика устранила или минимизировала все артефакты и шумы.

Анализ донной поверхности Песчаного сегмента Южного Байкала с помощью ЦМР выявил новые и более детальные, чем раньше, данные о рельефе дна, позволил более тщательно исследовать его морфологические особенности, которые ранее были не доступны по данным ИНТАС.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания ИГ СО РАН (№ госрегистрации темы АААА-А17-117041910167-0) и ЛИИ СО РАН (№ госрегистрации темы (АААА-А16-116122110064-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузо С. Первые исследователи глубин Байкала. [Электронный ресурс]. — <http://www.magicbaikal.ru/history/first-researchers-of-baikal-death.htm> (дата обращения 15.07.2016).
2. Озеро Байкал. Навигационная карта. М-6 1:200 000. — СПб.: Изд-во Гл. упр. навигации и картографии МО СССР, 1992. — 4 л.
3. De Batist M., Canals M., Sherstyankin P.P., Alekseev S. The INTAS Project 99-1669 Team. A new bathymetric map of Lake Baikal, 2002 [Электронный ресурс]. — <http://www.lin.irk.ru/insta/index.html> (дата обращения 15.07.2016).
4. Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Хабуев А.В., Белоусов О.В., Наудс Л. Геолого-геоморфологические особенности Посольской банки и Кукуйской гривы оз. Байкал // Геология и геофизика. — 2016. — Т. 57, № 12. — С. 2229–2239.
5. Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Минами Х., Казаков А.В., Хабуев А.В., Губин Н.А., Ченский Д.А., Ченский А.Г., Стуруин А.Н. О рельефе и генезисе подводной возвышенности Мурунская банка (Южный Байкал) // География и природ. ресурсы. — 2016. — № 5. — С. 109–116.

6. **Standards** for Digital Elevation Models (Part 1: General, Part 2: Specifications, Part 3: Quality Control). [Электронный ресурс]. — https://en.wikipedia.org/wiki/USGS_DEM (дата обращения 15.07.2016).
7. **Wang L., Liu H.** An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // Internat. Journ. of Geographical Inform. Science. — 2006. — N 20. — P. 193–213.
8. **Planchon O., Darboux F.** A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // Catena. — 2002. — N 46 (2–3). — P. 159–176.
9. **Vosselman G.** Slope based filtering of laser altimetry data // Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000. — N 33. — P. 935–942.
10. **Stevenson J.A., Sun X., Mitchell N.C.** Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm // Geomorphology. — 2010. — Vol. 114, N 3. — P. 238–252.
11. **Patterson T.** Getting real: Reflecting on the new look of national park service maps // Cartographic Perspectives. — 2000. — N (43). — P. 43–56.
12. **GeoStore** Home. Elevation Models. WorldDEM™ [Электронный ресурс]. — <https://www.intelligence-airbusds.com/en/8703-worlddem> (дата обращения 15.07.2016).
13. **Атлас** озера Байкал. 65064*. Прибрежная часть (проекция Гаусса). М-б 1:50 000. — СПб.: Изд-во Глав. Упр. навигации и океанографии МО РФ, 2001. — 84 с.

Поступила в редакцию 16.10.2020

После доработки 02.11.2020

Принята к публикации 02.11.2020
