

УДК 556.55(282.256.341)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_95_34-41

Н. А. Губин, К. А. Григорьев, Д. А. Ченский, А. Г. Ченский
(Иркутский национальный исследовательский технический университет)

КОМПЛЕКСНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ОЗЕРА БАЙКАЛ

В предлагаемой работе излагаются основные подходы по комплексному получению гидрографических данных на озере Байкал с использованием специальной геофизической аппаратуры – многолучевого эхолота Kongsberg EM710S, а также профилографа «Knudsen CHIRP 3260». В качестве результата представлена построенная на основе массива батиметрических данных цифровая модель подводного рельефа вблизи пос. Большое Голоустное, которая позволила выделить вдоль подводного склона хорошо развитые хребты и склоны, а также определить места выхода газа со дна.

Ключевые слова: озеро Байкал, батиметрическая съемка, гидрографические работы, гидроакустические средства, многолучевой эхолот, профилограф, цифровая модель рельефа.

N. A. Gubin, K. A. Grigorev, D. A. Chenskiy, A. G. Chenskiy
(Irkutsk National Research Technical University)

INTEGRATED REPRESENTATION OF HYDROGRAPHIC DATA FOR STUDYING LAKE BAIKAL

The proposed paper outlines the main approaches to the integrated acquisition of hydrographic data on Lake Baikal using special geophysical equipment, the Kongsberg EM710S multibeam echo sounder, as well as the Knudsen CHIRP 3260 subbottom profiler. As a result, a digital model of the underwater surface near the village of Bolshoye Goloustnoye is presented. It made it possible to identify well-developed ridges and slopes along the underwater slope, as well as to determine the places where gas seeps out from the bottom.

Keywords: Lake Baikal, bathymetric survey, hydrographic works, hydroacoustic means, multi-beam echo sounder, profiler, digital surface model.

Для цитирования: Губин Н. А. Комплексное представление гидрографических данных по исследованию озера Байкал / Н. А. Губин, К. А. Григорьев, Д. А. Ченский, А. Г. Ченский // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 95. – С. 34–41. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_34-41

Введение. С каждым годом человек все более подробно изучает донную поверхность океанов, морей, озер и рек, тем самым увеличивая количество получаемой информации о строении подводного рельефа. Одним из озер, акватория которого активно изучается, является озеро Байкал.

История исследований донной поверхности озера Байкал началась еще в конце XVIII в., когда были проведены первые батиметрические работы [1]. Позже, на протяжении конца XIX и всего XX веков, неоднократно предпринимались попытки создания батиметрических моделей донной поверхности озера [3]. В последние 20–25 лет исследования дна озера носят наиболее интенсивный характер, что связано, в том числе с реализацией многочисленных международных программ по изучению климата Центральной Азии, геологии и углеводородов Байкальской впадины. Благодаря использованию новейших технических и технологических возможностей получены большие массивы данных по рельефу дна озерной впадины и ее осадочному наполнению [2; 5; 6; 9].

На текущий момент проведение исследований подводной среды акваторий сопряжено

с использованием средств дистанционного гидроакустического зондирования. Средствами дистанционного зондирования являются различные гидроакустические устройства, такие как гидролокаторы бокового обзора, профилографы морского дна, однолучевые и многолучевые эхолоты.

Все эти устройства, направленные на обнаружение подводных объектов, имеют схожую основу, которую составляет приемопередатчик, посылающий звуковые импульсы в требуемом направлении, а также принимающий отраженные импульсы, если посыл, встретив на своем пути какой-либо объект, отразится от него. По значению величины скорости звука и времени прохождения сигнала от источника до приемника можно определить расстояние между ними, а значит интенсивность отраженного сигнала, структуру поверхности, от которой он отразился. Наиболее эффективным из всех вышеперечисленных средств дистанционного изучения поверхности дна в силу своей универсальности являются многолучевые эхолоты.

Объект и методы исследования. В 2017 г. сотрудниками Иркутского национального исследо-

вательского технического университета (ИРНИТУ), совместно с Лимнологическим институтом Сибирского отделения Российской академии наук (ЛИН СО РАН) и Всероссийским научно-исследовательским геологическим институтом им. А. П. Карпинского для проведения научно-исследовательских работ по исследованию донной поверхности Байкальской котловины был применен промерный комплекс на базе многолучевого эхолота «Kongsberg EM710S» и профилографа «Knudsen CHIRP 3260», установленного на научно-исследовательском судне ЛИН СО РАН «Титов».

В ходе выполнения этих работ было проведено дистанционное гидроакустическое обследование участка донной поверхности на озере Байкал вблизи пос. Большое Голоустное (рис. 1). Общая площадь исследованной поверхности составила приблизительно 700 км², в ходе проведения исследований было получено более 400 линейных километров профилей дна озера, были идентифицированы и отсняты участки выхода газа со дна.

Площадное исследование поверхности дна было проведено за счет возможности многолучевого эхолота «Kongsberg EM710S» получать большой объем информации сразу по всей полосе обзора, которая может достигать 2300 м. Большая полоса обзора достигается за счет того, что в многолучевом эхолоте формируется веер из сотен узких акустических лучей, в плоскости поперечной линии движения судна, многолучевой эхолот может получать топографический вид морского дна, строить цифровую трехмерную модель рельефа [10].

Цифровая модель рельефа (ЦМР) является одной из самых важных компонент в пространственной базе данных любой геоинформационной системы, без которой нельзя получить представ-

ление о рельефе дна. Высокодетальная, корректно построенная посредством возможностей современных геоинформационных систем (ГИС), ЦМР позволяет с высокой точностью проводить комплексный морфологический и морфометрический анализ, моделировать различные экзогенные процессы, быть базовой основой для любого вида топобатиметрического и тематического картирования.

Проведенная многолучевым эхолотом «Kongsberg EM710S» высокоразрешающая батиметрическая съемка позволила получить батиметрические параметры, по вертикали с разрешением первые сантиметры, а по горизонтали – первые метры, что в 10 раз лучше существующей батиметрической карты, выполненной в рамках проекта INTAS [8].

В качестве дополнительного параметра, помимо батиметрических данных для создания ЦМР, «Kongsberg EM710S» имеет функцию водного столба (WATERCOLUMN) и обратного рассеяния (BACKSCATTER). В основе работы обеих функций лежит возможность аппаратуры детектировать амплитуды отраженного от дна и в водный толще эхо-сигнал.

Результаты анализа и обсуждение. Для выполнения достоверного морфологического и морфометрического анализа была построена более детализированная ЦМР (рис. 2), позволяющая понять и правильно воссоздать моделирующие экзогенные процессы. В качестве базовой основы ЦМР (рис. 2) были использованы батиметрические данные, преобразованные в трехмерную поверхность, содержащую информацию обо всех высотных отметках внутри указанной площади.

В процессе обработки полученных цифровых данных используются стандартные инстру-

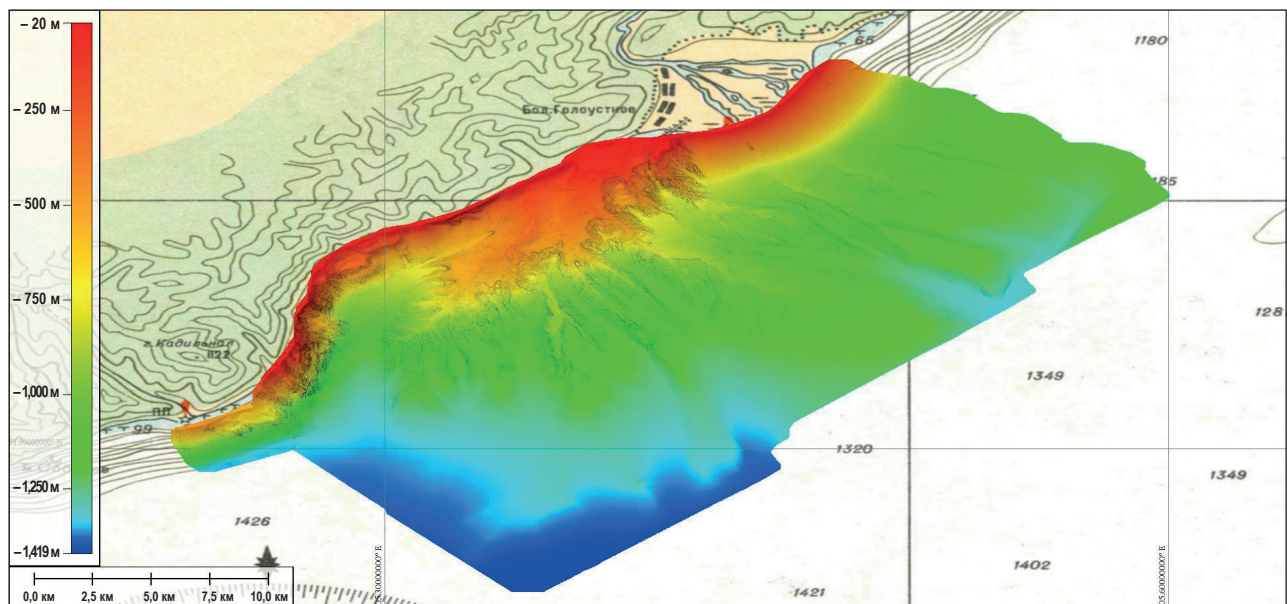


Рис. 1. Закартированная площадь (Большое Голоустное)

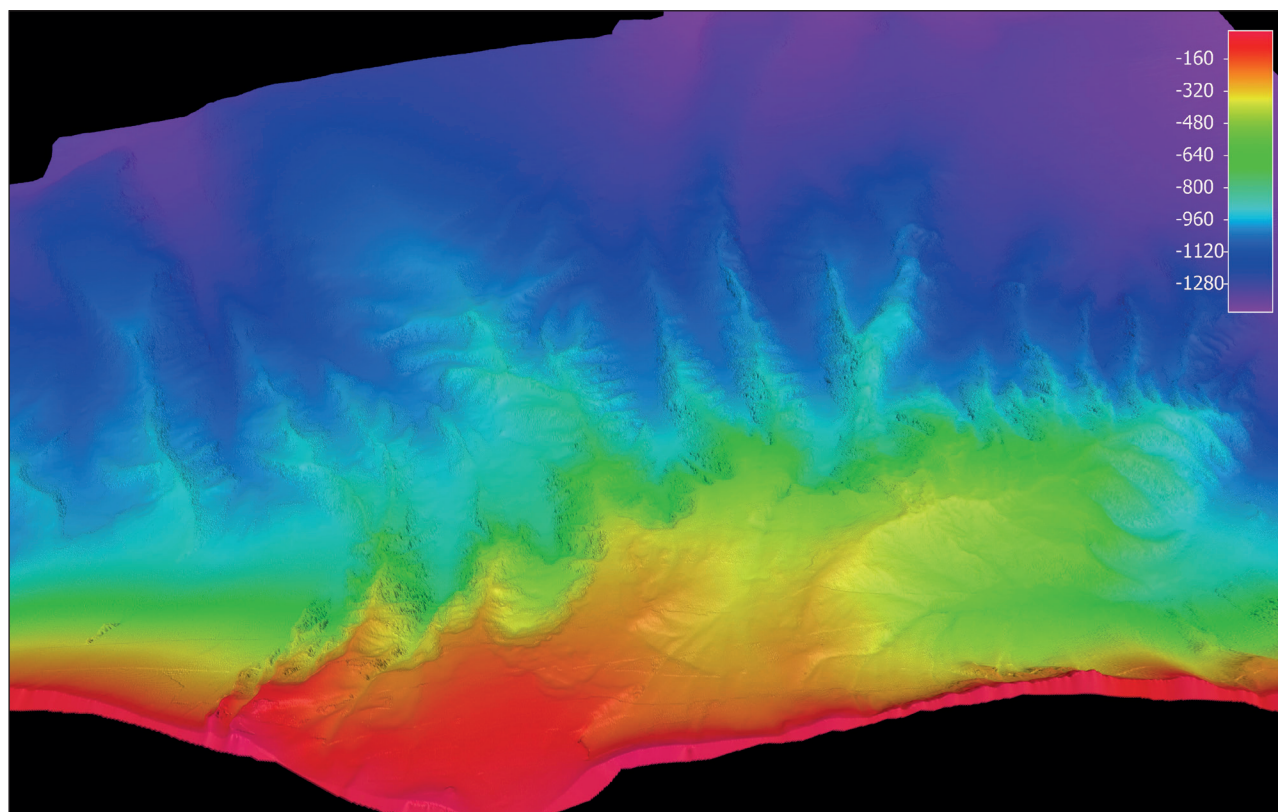


Рис. 2. Изображение цифровой модели рельефа дна вблизи пос. Большое Голоустное

менты «отсеивания» – фильтрации точек, не описывающих реально существующие на дне объекты, что позволяет исключить возможность ошибок, связанных с определением угла уклона поверхности.

Анализ ЦМР позволил наиболее точно определить уклоны и перепады подводного рельефа, что

позволяет проводить более точный дальнейший анализ данных обратного рассеяния.

Интерпретация данных обратного рассеяния представляется в виде градиентного изображения (рис. 3). Изображение позволяет напрямую сравнивать значения интенсивности одной и другой точки [12]. В процессе обработки данные обратного

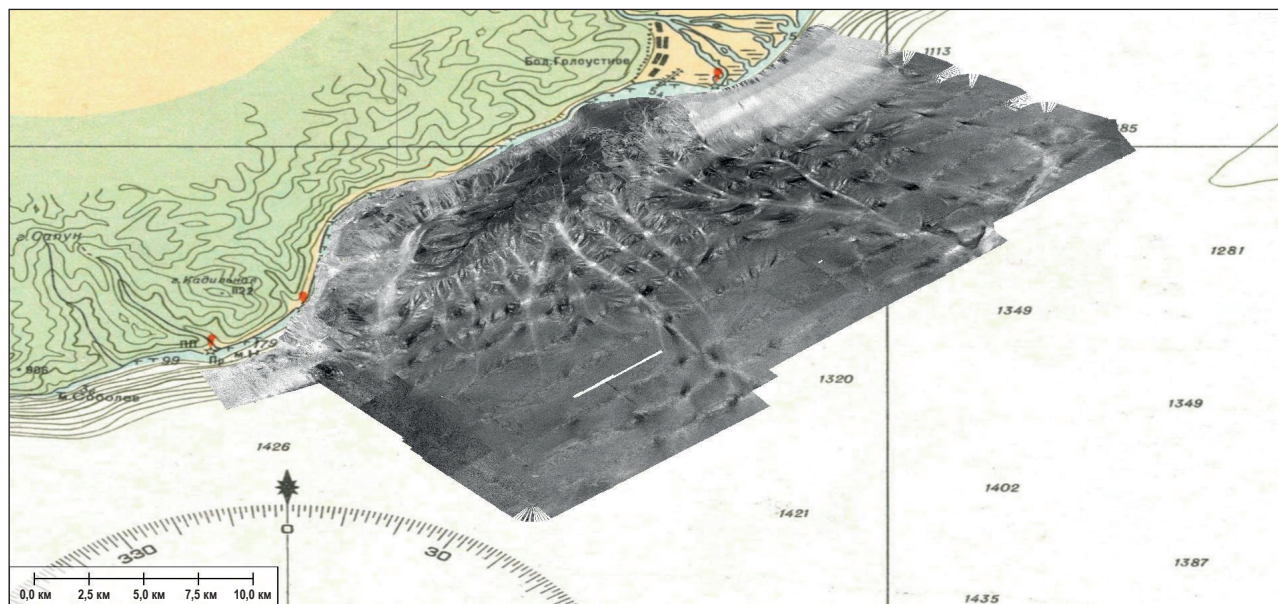


Рис. 3. Изображение дна, полученное по данным обратного рассеяния

рассеяния пересчитываются в интенсивности отраженного сигнала. Результирующее изображение выглядит так, как будто дно плоское.

Полученное изображение может содержать некоторые шумы и пробелы в данных. После нормализации и усреднения по полосам сканирования полученное растровое изображение данных обратного рассеяния обладает точностью геопозиционных размеров 40 м на пиксель.

Для того чтобы идентифицировать границы текстурных узоров в теневом изображении дна, полученных на основе данных обратного рассеяния, был использован метод обработки изображений с матрицей, градуированной по уровням серого цвета (GLCM). Определение характеристик состава донного грунта проведено путем сравнения фактических вариаций интенсивности сигнала обратного рассеяния с ожидаемым акустическим откликом в соответствии с моделью Джексона [11].

Модель формируется путем задания значений ряда коэффициентов, таких как частота излучаемого сигнала, потери, шероховатость, скорость звука, плотность и объем отложений. Параметры определяются характеристиками структуры дна, размером зерна наносов, пористостью (рыхлостью), уклоном дна и водопроницаемостью (насыщением слоя отложений водой). Более плотные осадочные породы характеризуются более высоким коэффициентом отражения и более высокой внутренней скоростью распространения звука, которая на самом деле может быть меньше или больше скорости звука в воде.

Все полученные значения интенсивности имеют зависимость от угла отражения и могут использоваться для определения характеристик морского дна.

Использование указанных функций позволяет получать не только трехмерное изображение рельефа дна с возможностью определения его характеристик, но и облегчает поиск и определение находящихся на дне объектов. Полученные во время измерений данные водного столба могут служить для поиска, определения пространственных координат и размеров, различных подводных сооружений и объектов, а также оценки их техногенного воздействия на окружающую подводную среду.

Например, данные водного столба, полученные возле пос. Большое Голоустье (рис. 4), после соответствующей обработки могут быть добавлены к цифровой модели рельефа (рис. 5) и в дальнейшем использованы для определения размеров газового факела и расчета интенсивности потоков пузырькового выхода газа.

Анализ потоков газовых факелов производился по данным водного столба путем выборки значений отраженного сигнала с относительным уровнем от -24 до -65 дБ с последующим построением проекции пузырьковых образований на вертикальную плоскость. Приведение уровней отраженного сигнала к единой шкале выполнялось согласно методике [12]. Указанные газовые

факелы образуют некое поле с газовыми выбросами, которые характеризуются исключительно мощным потоком метана из осадков, достигающим поверхности воды.

Обнаруженное поле ранее уже частично обследовалось во время погружения глубоководных обитаемых аппаратов (ГОО) «Мир-1» и «Мир-2» в период 2008–2010 гг. [7]. Это поле, расположенное на глубине 420 м, является самым мелководным газогидратным полем в мире. При более детальном изучении полученных данных можно проследить за газовыми пузырями до самого дна, на котором отчетливо видна геологическая структура в виде каньона с вертикальными стенками, связанная, по-видимому, с интенсивным выбросом газа из осадка.

При комплексном анализе полученной трехмерной модели и данных об интенсивностях отраженного сигнала (рис. 6) можно увидеть, что на полученном изображении достаточно четко видны линейно-вытянутые полосы, топографически совпадающие с днищами каньонов, с поверхностью конуса выноса, а также с долинами оврагов, разрезающих подводный склон каньона и северный подводный склон котловины. Борта каньона при этом с большой долей вероятности сложены рыхлыми отложениями.

Помимо возможности использования дополнительных данных, получаемых многолучевым эхолотом «Kongsberg EM710S», отличительной особенностью проведенных работ также являются данные о структуре поверхностного слоя донных отложений. Получение информации о структуре донных отложений стало возможным за счет одновременного использования в промерном комплексе многолучевого эхолота и глубоководного профилографа морского дна «Knudsen CHIRP 3260».

Профилографы морского дна по своей сути представляют собой практически тот же однолучевой эхолот, но с очень низкой частотой излучаемого сигнала: менее 12 кГц. За счет физических особенностей проникновения низкочастотных звуковых волн в твердые среды и большой мощности сигналов акустический сигнал проникает в донный грунт на глубину: чем меньше частота сигнала, тем больше проникающая способность.

В первую очередь, профилографы применяются для поиска заглубленных в дно подводных объектов, исследования и классификации состава грунта дна, например, для проведения разведки полезных ископаемых и экологического мониторинга.

Совместное использование указанного оборудования в виде единого промерного комплекса позволяет получать не только батиметрическую информацию для определения рельефа донной поверхности, но и получить данные о строении верхней части осадочного слоя (рис. 7).

Вся полученная информация может быть объединена и использована для проведения более детального анализа (рис. 8). В самом простом варианте процесс анализа может заключаться в сопоставлении формы подводного рельефа со

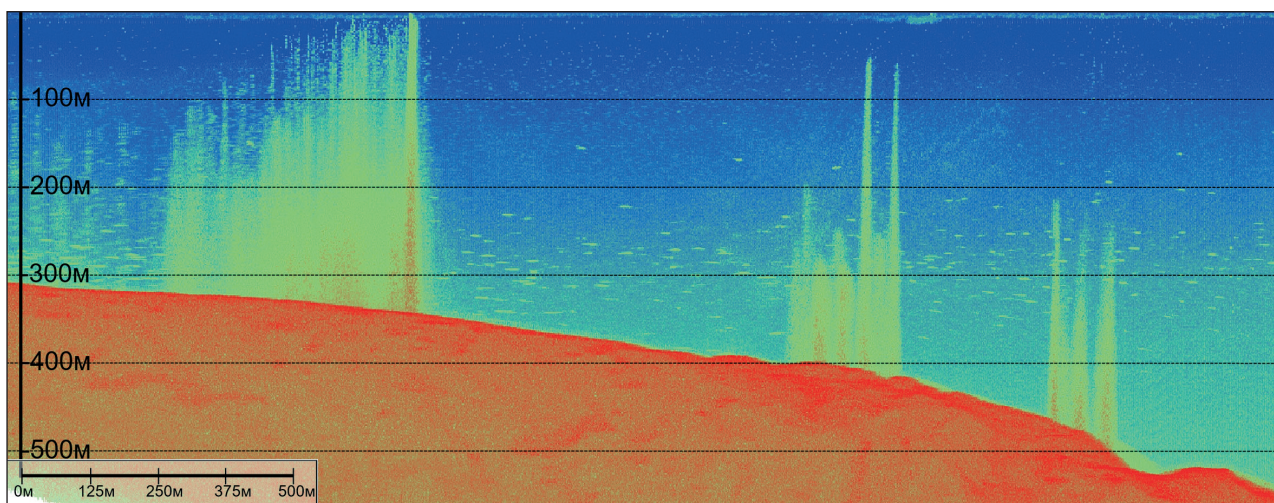


Рис. 4. Изображение водного столба, снятого на подводном склоне возле пос. Большое Голоустное

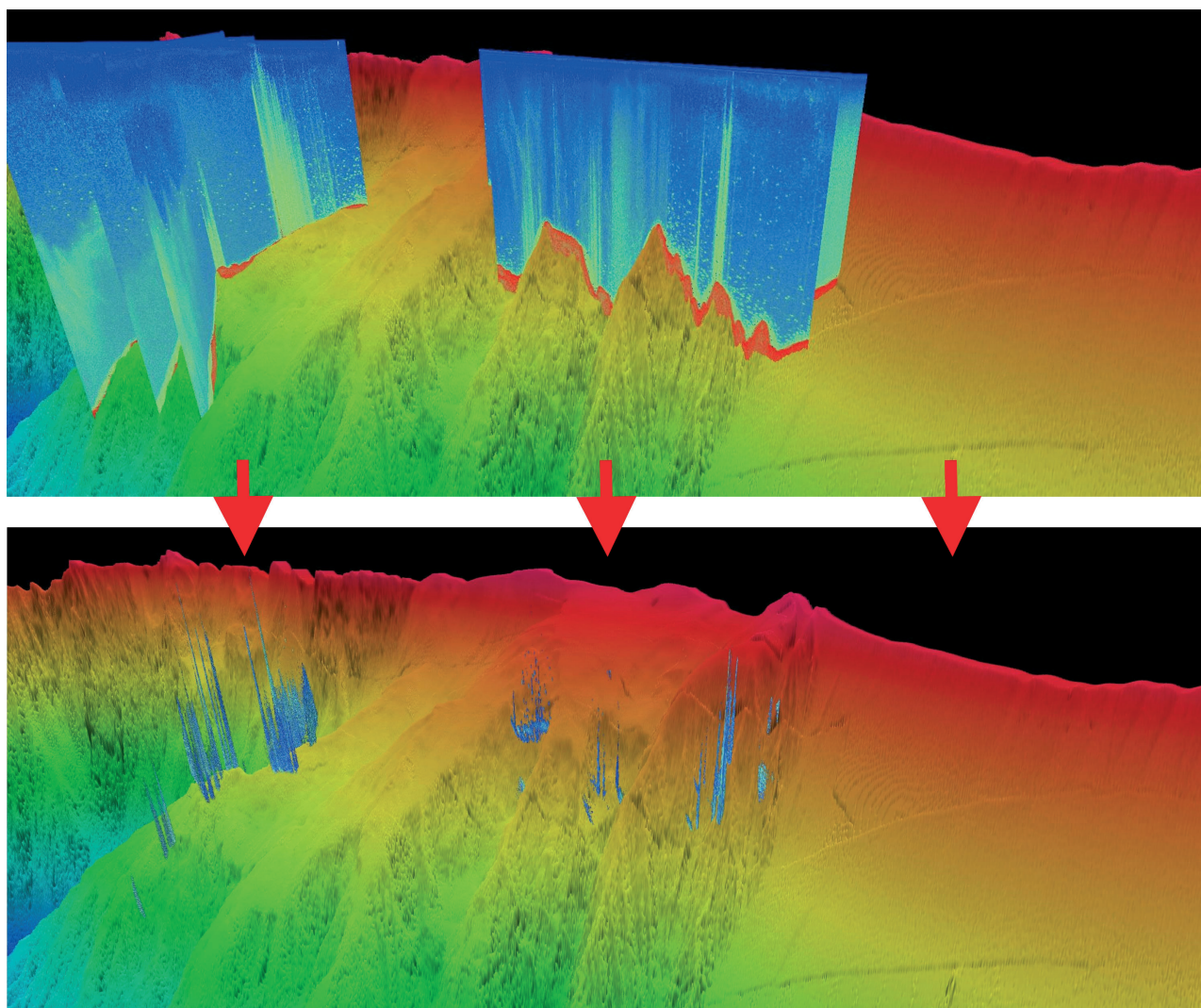


Рис. 5. Трехмерное изображение данных водного столба вместе с созданной цифровой моделью рельефа

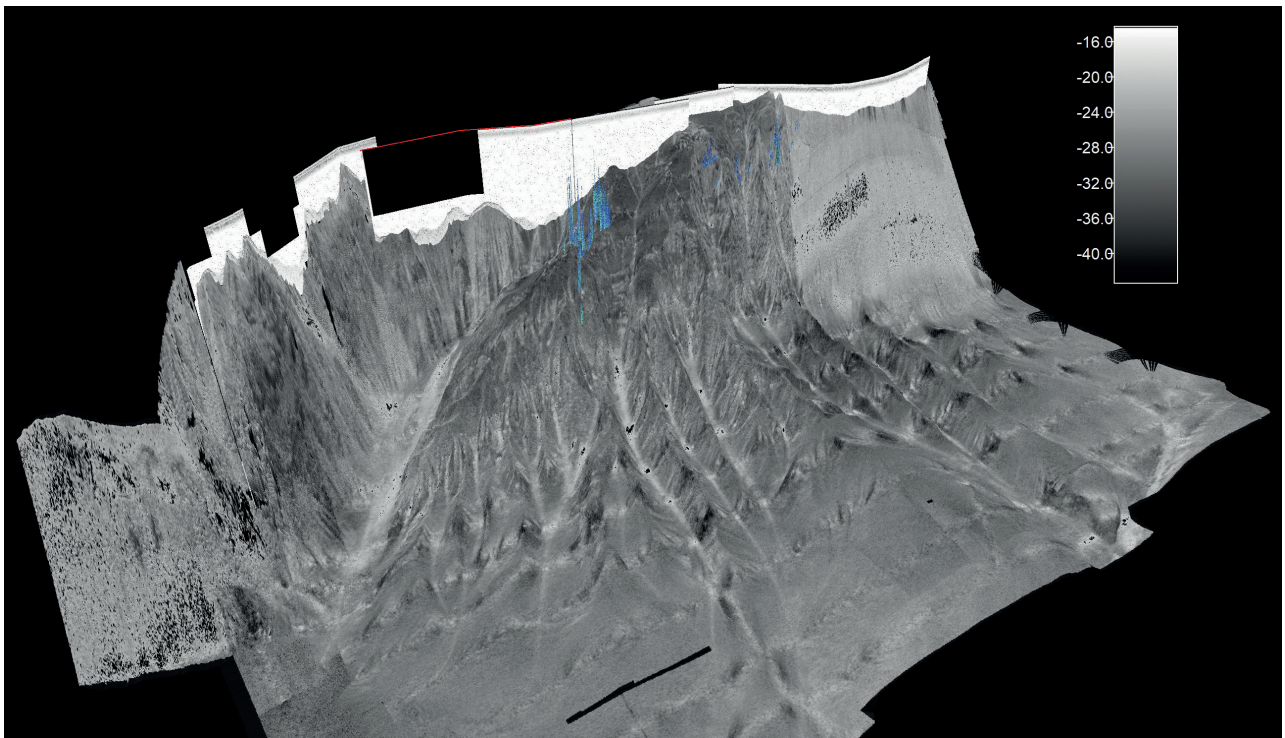


Рис. 6. Цифровая модель рельефа вместе с данными обратного рассеяния

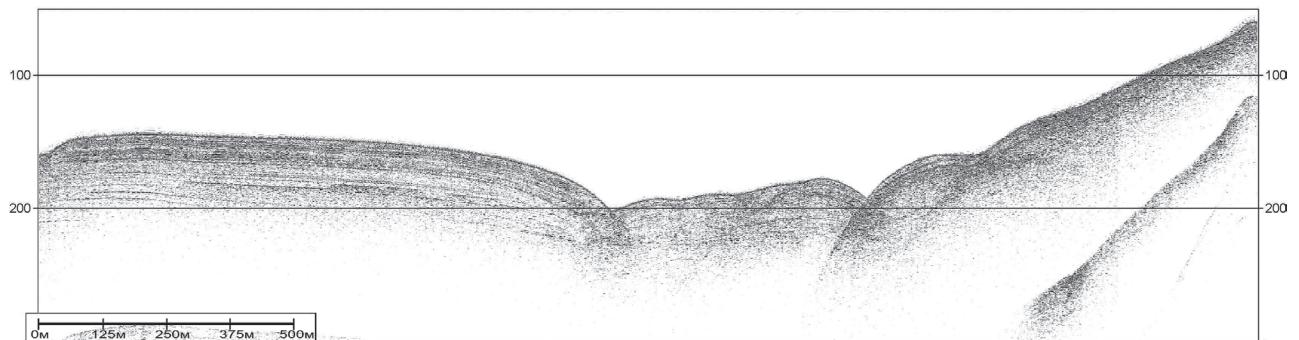


Рис. 7. Изображение профиля дна, полученное по данным профилографа «CHIRP 3260» в районе пос. Большое Голоустное

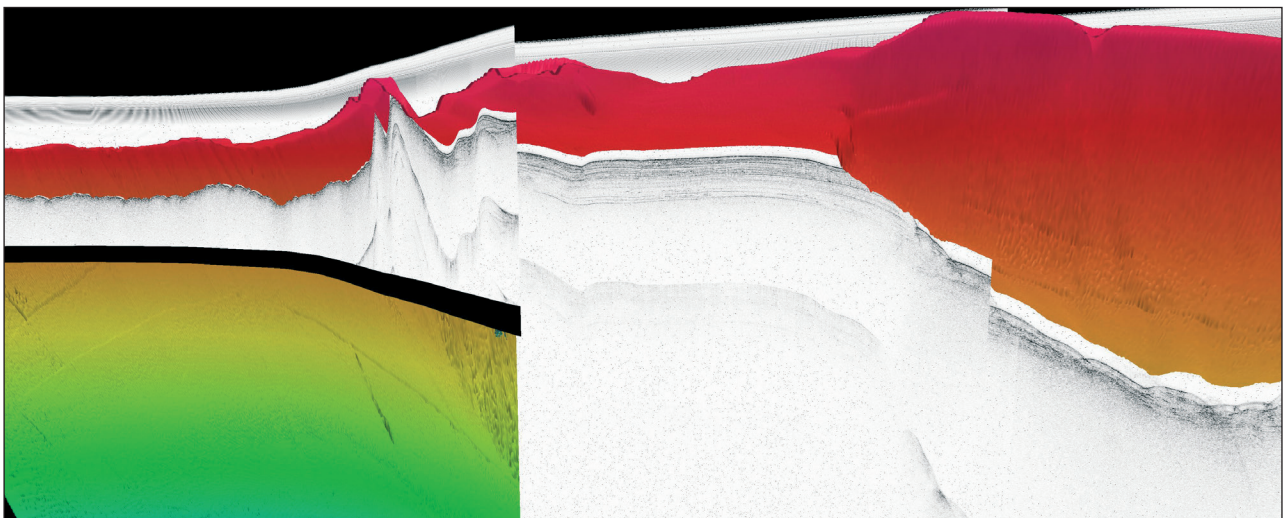


Рис. 8. Трехмерное изображение дна, совмещенное с данными профилографа

структурой донных отложений для определения различных геоморфологических процессов.

Одним из геоморфологических процессов, проявления которого можно увидеть, являются крипы и оползни, выраженные в песчаных потоках, а на более резких перепадах профиля склона даже «пескопады», наблюдаемые в каньонах. Это связано с тем, что при уклоне морского дна в 3–5° могут возникнуть оползневые явления. Для того чтобы спровоцировать подводное оползание, достаточно небольшого сейсмического толчка или даже серии ритмических колебаний давления столба воды. На более крутых склонах оползни могут возникать самопроизвольно, как только масса накапливающейся на наклонной поверхности толщи осадков превысит предел их прочности.

Заключение. Совместное использование вышеуказанного оборудования в виде единого промерного комплекса имеет неоспоримые преимущества по сравнению с независимым и разделенным использованием.

В первую очередь, это возможность производить оперативный контроль процесса измерений, опираясь на параллельно получаемую информацию о рельефе дна для получения максимально детализированных данных.

С точки зрения апробации, данные, одновременно полученные с двух приборов, дают возможность производить мониторинг русловых процессов, определять амплитуду и объемы перемещения донных наносов на одном и том же участке морского дна с более точной привязкой к рельефу донной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузо С. Первые исследователи глубин Байкала [Электронный ресурс] // Восточно-Сибирская правда. – 1951. – URL: <http://www.magicbaikal.ru/history/first-researchers-of-baikal-death.htm> (дата обращения: 21.11.2022).
2. Геолого-геоморфологические особенности Посольской банки и Кукуйской гряды озера Байкал / О. М. Хлыстов, Е. Е. Кононов, А. В. Хабуев, О. В. Белосусов, Н. А. Губин, М. А. Соловьева, Л. Наудс // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 5, № 12. – С. 2229–2239.
3. Колотило Л. Г. Военные моряки Байкала: проблемы исторической реконструкции деятельности военных моряков российского флота по физико-географическому изучению и освоению озера Байкал в XVIII–XX вв. – СПб.: Наука, 2004. – 560 с.
4. Кононов Е. Е., Хлыстов О. М. О возрасте Глубоководного Байкала // Известия Сибирского отделения Секции наук о земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – Иркутск, 2017. – № 4. – С. 118–129.
5. Новые данные о рельефе подводного южного склона Южно-Байкальской котловины / О. М. Хлыстов, Е. Е. Кононов, Х. Минами, А. В. Казаков, А. Хабуев, Н. А. Губин, А. Г. Ченский // География и природные ресурсы. – 2018. – № 1. – С. 59–65.
6. О рельефе и генезисе подводной возвышенности Муриинская банка (Южный Байкал) / О. М. Хлыстов,

Е. Е. Кононов, Х. Минами, А. В. Казаков, А. В. Хабуев, Н. А. Губин, Д. А. Ченский, А. Г. Ченский, А. Н. Сутурин // География и природные ресурсы. – 2016. – № 5. – С. 109–116.

7. Сагалевиц А. М. Глубоководные обитаемые аппараты в научных исследованиях Байкала // Вестник ИрГСХА. – Иркутск, 2013. – С. 141–153.

8. A new bathymetric map of Lake Baikal / M. De Batist, M. Canals, P. Sherstyankin, S. Alekseev // INTAS Project 99-1669 Team. – 2006.

9. Age of mud breccia from mud volcanoes in Academician Ridge, Lake Baikal / O. M. Khlystov, H. Minami, A. Hachikubo, S. Yamashita, M. De Batist, L. Nauds, A. V. Khabuev, A. G. Chenskiy, N. A. Gubin, S. S. Vorobyeva // Geodynamics & Tectonophysics. – 2017 – Vol. 8, no. 4. – Pp. 923–932.

10. Combined hydroacoustic research of Lake Baikal / N. A. Gubin, K. A. Grigorev, A. S. Poletaev, A. G. Chenskiy // Journal of Physics: Conference Series. – 2021.

11. Jackson D. R., Richardson M. D. High-frequency seafloor acoustics // The Underwater Acoustics Series. – 2007. – Pp. 1–634.

12. Mapping the Seabed and Shallow Subsurface with Multi-Frequency Multibeam Echosounders / T. C. Gaida, T. H. Mohammadloo, M. Snellen, D. G. Simons // Remote Sens. – 2019. – Vol. 12, no. 52. – Pp. 1–24.

REFERENCES

1. Buzo S. Pervye issledovateli glubin Baykala [The first explorers of the depths of Baikal]. *East Siberian Truth*, 1951, URL: <http://www.magicbaikal.ru/history/first-researchers-of-baikal-death.htm> (21.11.2022).
2. Khlystov O. M., Kononov E. E., Khabuev A. V. et al. Geologo-geomorfologicheskie osobennosti Posol'skoy banki i Kukuyskoy grivy ozera Baykal [Geological and geomorphological features of the Posolskaya Bank and Kukuy Griva Lake Baikal]. *Geology and geophysics*, 2016, vol. 5, no. 12, pp. 2229–2239.
3. Kolotilo L. G. Voennye moryaki Baykala: problemy istoricheskoy rekonstruktsii deyatel'nosti voennykh moryakov rossiyskogo flota po fiziko-geograficheskomu izucheniyu i osvoeniyu ozera Baykal v XVIII–XX vv. [Naval Sailors of Baikal: Problems of Historical Reconstruction of the Activities of Naval Sailors of the Russian Fleet in Physical and Geographical Study and Development of Lake Baikal in the 18th–20th Centuries]. St. Petersburg, Nauka, 2004, 560 p.
4. Kononov E. E., Khlystov O. M. O vozraste Glubokovodnogo Baykala [On the age of Deep-water Baikal]. *Izvestiya of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, exploration and development of mineral deposits*. Irkutsk, 2017, no. 4, pp. 118–129.
5. Khlystov O. M., Kononov E. E., Minami Kh. et al. Novye dannye o rel'efe podvodnogo yuzhnogo sklona Yuzhno-Baykal'skoy kotloviny [New data on the relief of the underwater southern slope of the South Baikal Basin]. *Geography and nature resources*, 2018, no. 1, pp. 59–65.
6. Khlystov O. M., Kononov E. E., Minami Kh. et al. O rel'efe i genezise podvodnoy vozvyshennosti Murinskaya banka (Yuzhnyy Baykal) [On the Relief and Genesis of the Underwater Rise of the Murinskaya Bank (Southern Baikal)]. *Geography and nature resources*, 2016, no. 5, pp. 109–116.
7. Sagalevich A. M. Glubokovodnye obitaemye apparaty v nauchnykh issledovaniyakh Baykala [Deep-sea manned vehicles in scientific research of Baikal]. *Bulletin of IrGSHA*. Irkutsk, 2013, pp.141–153.
8. Batist M. De, Canals M., Sherstyankin P. et al. A new bathymetric map of Lake Baikal. *INTAS Project 99-1669 Team*, 2006.

9. Khlystov O. M., Minami H., Hachikubo A. et al. Age of mud breccia from mud volcanoes in academican ridge, Lake Baikal. *Geodynamics & tectonophysics*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 923–932.

10. Gubin N. A., Grigorev K. A., Poletaev A. S. et al. Combined hydroacoustic research of Lake Baikal. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021.

11. Jackson D. R., Richardson M. D. High-frequency seafloor acoustics. *The Underwater Acoustics Series*, 2007, pp. 1–634.

12. Gaida T. C., Mohammadloo T. H., Snellen M. et al. Mapping the Seabed and Shallow Subsurface with Multi-Frequency Multibeam Echosounders. *Remote Sens*, 2019, vol.12, no. 52, pp. 1–24.

Губин Никита Андреевич – вед. инженер-электроник. <Gubin.1@yandex.ru>

Григорьев Кирилл Анатольевич – инженер-электроник. <gka_1986@mail.ru>

Ченский Дмитрий Александрович – вед. инженер-электроник. <dimpson05@yandex.ru>

Ченский Александр Геннадьевич – зав. кафедрой. <chens-01@yandex.ru>

Gubin Nikita Andreevich – Leading Electronics Engineer. <Gubin.1@yandex.ru>

Grigorev Kirill Anatolevich – Electronics Engineer. <gka_1986@mail.ru>

Chenskiy Dmitriy Aleksandrovich – Leading Electronics Engineer. <dimpson05@yandex.ru>

Chenskiy Aleksandr Gennadevich – Head of Department. <chens-01@yandex.ru>

Иркутский национальный исследовательский технический университет. Ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия, 664074.
Irkutsk National Research Technical University. 83 Ul. Lermontova, Irkutsk, Russia, 664074.