

## ИССЛЕДОВАНИЯ В БАССЕЙНЕ БАЙКАЛА

УДК 528.422

DOI: 10.15372/GIPR20220308

**Н.А. ГУБИН\*, Е.Е. КОНОНОВ\*\*, А.С. ПОЛЕТАЕВ\*, А.Г. ЧЕНСКИЙ\***

\*Иркутский национальный исследовательский университет,  
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
gubin.l@yandex.ru, sardaukar9@yandex.ru, zavmts@istu.edu

\*\*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, ekon@7395.ru

### ПОДВОДНЫЙ РЕЛЬЕФ И ОСАДКИ В РАЙОНЕ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГ (ОЗЕРО БАЙКАЛ)

*Проведен комбинированный анализ строения грязевого вулкана Санкт-Петербург и окружающей его донной поверхности озера с использованием батиметрических и сейсмоакустических материалов, данных обратного рассеяния и водного столба. Для донной поверхности в районе вулкана создана высокоточная цифровая модель рельефа с горизонтальным разрешением до 10 м. Анализ построенной модели позволил уточнить морфометрические параметры рассмотренной подводной структуры и сделать ее детальное морфологическое описание. Установлено, что вулканическая постройка состоит из нескольких грядобразных фрагментов, расположенных на крыльях Гидратного разлома и пересекающих его. Юго-восточнее разлома закартирована изогнутая в плане каньонообразная долина шириной до 800 м. Создано графическое изображение данных обратного рассеяния с распределением по типам осадочных пластов, оцененного путем сопоставления интенсивности отраженного сигнала с ожидаемыми значениями математической модели. По результатам анализа данных установлено, что грязевой вулкан в основном состоит из глины с возможным вкраплением относительно крупных обломков (до 10 см). На донной поверхности вокруг вулкана, предположительно, также встречаются крупные обломки, но доминируют мелкозернистые фракции — песчаные, глинистые и илестые. Выполнена трехмерная визуализация данных водного столба для зоны исследования с обнаруженными выходами газа в виде двух факелов с наблюдаемыми высотами 800 и 700 м. По статистической выборке значений уровней отраженного сигнала интенсивность выхода газа в факелах отличается приблизительно в семь раз. Сейсмоакустические данные профилографа свидетельствуют о возможном наличии газовых гидратов.*

**Ключевые слова:** Байкал, грязевые вулканы, батиметрия, многолучевой эхолот, цифровая модель рельефа.

**N.A. GUBIN\*, E.E. KONONOV\*\*, A.S. POLETAEV\*, A.G. CHENSKY\***

\*Irkutsk National Research Technical University, ul. Lermontova, 83, Irkutsk, 664074, Russia,  
gubin.l@yandex.ru, sardaukar9@yandex.ru, zavmts@istu.edu

\*\* V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
ul. Ulan-Batorskaya, 1, Irkutsk, 664033, Russia, ekon@7395.ru

### UNDERWATER RELIEF AND SEDIMENTS IN THE AREA OF THE ST. PETERSBURG MUD VOLCANO (LAKE BAIKAL)

*A combined analysis is made of the structure of the St. Petersburg mud volcano and the lake bottom surface surrounding it by using bathymetric, seismoacoustic, backscatter and water column data. A high-precision digital elevation model with a horizontal resolution of up to 10 meters was developed for the bottom surface in the area of the volcano. By analyzing the resulting model, it was possible to update the morphometric parameters of the underwater structure under consideration and prepare its detailed morphological description. It was found that the volcanic edifice consists of several ridge-like parts located on the wings of the Gidratnyi Fault and crossing it. A canyon-shaped and curved in plan 800-m wide valley was mapped to the south-east of*

*the fault. A graphical representation of backscatter data with separation by types of sedimentary layers was created via comparison of the intensity of the reflected signal and expected mathematical model values. Based on the results of the data analysis, it was established that the mud volcano largely consists of clay with the possible inclusion of relatively large fragments (up to 10 cm). On the bottom surface around the volcano there presumably are also large fragments; however, fine-grained fractions (sandy, clays and silts) are dominant. A three-dimensional visualization of the water column data is presented for the study area with outcrops of gas in the form of two the detected gas flares with the observed heights of 800 and 700 meters. According to a statistical sample of the values of the reflected signal amplitudes, the intensity of gas release in the flares differs by approximately 7 times. The seismoacoustic data of the chirp profiler indicate the possible presence of gas hydrates.*

**Key words:** *Baikal, mud volcanoes, bathymetry, multi-beam echo sounder, digital elevation model.*

## ВВЕДЕНИЕ

История исследований донной поверхности оз. Байкал началась еще в конце XVIII в., когда были проведены первые батиметрические работы [1]. Позже, в конце XIX–XX в., неоднократно предпринимались попытки создания батиметрических моделей донной поверхности озера [2]. Начиная с 2015 г. сотрудники Иркутского национального исследовательского технического университета совместно с сотрудниками лаборатории геологии Байкала Лимнологического института СО РАН и Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского ежегодно проводили работы по батиметрической съемке донной поверхности Байкальской котловины и созданию цифровой модели рельефа (ЦМР) [3–5].

Цель настоящей работы — установление на базе анализа ЦМР и сравнения фактических вариаций интенсивности сигнала обратного рассеяния с ожидаемым акустическим откликом морфологических особенностей рельефа грязевого вулкана Санкт-Петербург и характеристик донного грунта в районе вулкана.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во время полевых исследований для получения комплексных гидрографических данных о глубинах, рельефе и структуре дна оз. Байкал использовалась гидроакустическая система на базе многолучевого эхолота Kongsberg EM710S (МЛЭ) и профилографа Knudsen CHIRP 3260, установленных на научно-исследовательском судне «Г. Титов».

Глубоководный профилограф Knudsen CHIRP 3260 имеет два независимых канала с рабочей частотой в диапазоне 3,5–210 кГц с возможностью быстрого изменения частоты по любому каналу и режимом линейной частотной модуляции. Используемое с профилографом программное обеспечение Knudsen Sounder Suite позволяет импортировать получаемые данные в различные гидрографическое программное обеспечение (HYDRACK и Fledermause).

МЛЭ дает возможность получать большой объем информации сразу по всей полосе обзора (до 2300 м). Это достигается за счет того, что в МЛЭ формируется веерный импульс из 200 лучей в плоскости поперечной линии движения судна с возможностью регулировки расстояния между лучами, как по углу излучения, так и по фиксированному расстоянию. МЛЭ позволяет получать топографический вид озерного дна и на основе полученных данных создавать цифровую трехмерную модель рельефа. Созданная модель позволяет оценивать батиметрические параметры по вертикали с точностью до сантиметра и по горизонтالي с разрешением до 10 м.

Стабилизация лучей по бортовой, килевой и вертикальной качке судна выполнялась при помощи датчика динамических перемещений судна MRU-5 и навигационной GPS/GLONASS-системы Seapath 330. Измерение скорости звука во время экспедиционных работ производилось с помощью STD-зонда Sea-Bird SBE 37-SMP MicroCAT и измерителя скорости звука Valeportmini SVS. В качестве дополнительного параметра, помимо батиметрических данных, Kongsberg EM710S имеет функцию водного столба (WATERCOLUMN) и обратного рассеяния (BACKSCATTER) по линии развертки (лучам). В основе работы обеих функций лежит возможность аппаратуры детектировать амплитуды эхо-сигналов, отраженных от дна и в водной толще. Для анализа этих данных в составе Fledermause применены программные пакеты FMGeocoder Toolbox и MidWater. Интерпретация данных обратного рассеяния представляется в виде градиентного изображения. Изображение позволяет напрямую сравнивать значения интенсивности одной точки с другой [6]. В процессе обработки данные обратного рассеяния пересчитываются в интенсивности отраженного сигнала. 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 [7]. 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.

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 [8].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подводный грязевой вулкан Санкт-Петербург расположен на абиссальной поверхности Средней котловины в 16–17 км к востоку от пролива Ольхонские Ворота на глубине 1430–1440 м. Впервые вулкан был обнаружен в рамках проекта INTAS в 2002 г. [9]. Наши батиметрические данные, полученные с помощью МЛЭ в 2018 г., позволили построить для вулкана и окружающей его донной поверхности озера детальную ЦМР.

Анализ ЦМР показывает, что вулкан пересекается уступом Гидратного разлома (рис. 1) [10–13] на две части: верхняя часть располагается на поднятом крыле, а нижняя — на опущенном крыле тектонического уступа. Высота уступа варьирует в пределах 25–27 м. Поверхность сместителя имеет угол падения 20–25°. Максимальная глубина донной поверхности ниже уступа около 1435 м. Вулкан состоит из нескольких разобнесенных друг от друга фрагментов, расположенных вдоль Гидратного разлома, имеющего северо-восточное простирание. Расстояние между крайними фрагментами — 1200–1250 м. Высота вулканической постройки на приподнятом блоке составляет 5–7 м. В юго-западной

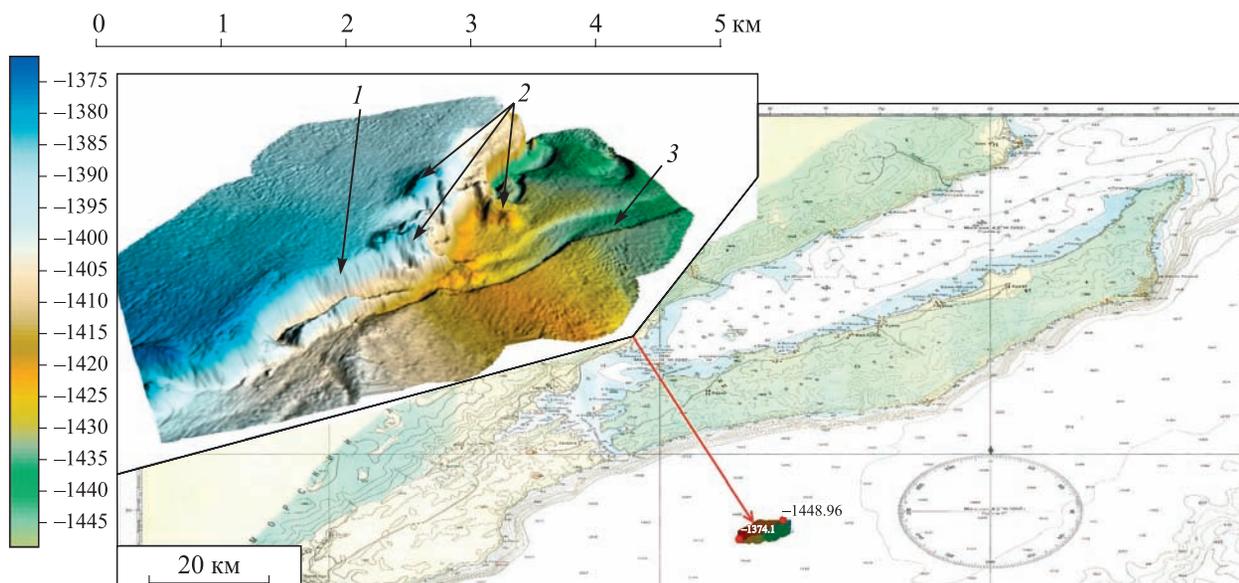


Рис. 1. Местоположение грязевого вулкана Санкт-Петербург и его батиметрическое изображение по данным многолучевой съемки донного рельефа, выполненной в 2018 г.

1 — поверхность сместителя разлома; 2 — фрагменты вулканической постройки; 3 — каньонообразная долина.

части фрагмент вулкана частично располагается на приподнятом крыле уступа, продолжается на поверхности сместителя разлома и выходит небольшими фрагментами на опущенном крыле. Внешне это выглядит остроконечной грядой, пересекающей зону разлома. Северо-восточный фрагмент не выражен на поднятой ступени, но также пересекает полость разлома и на опущенном крыле морфологически прекрасно просматривается в виде остроконечной гряды. Центральный фрагмент в виде узкой гряды протягивается вдоль края приподнятого крыла разлома. Ниже этой гряды небольшой фрагмент вулкана располагается на поверхности сместителя разлома.

Юго-восточнее разлома, примерно с запада на восток, протягивается слабоизвилистая каньонообразная долина с корытообразным поперечным профилем. Долина имеет плоское днище шириной до 800–850 м и крутые борта высотой 5–7 м. Тальвег долины имеет падение на восток с уклоном 0,5–1°. Западная часть долины под острым углом подходит к уступу разлома и на некотором расстоянии идет вдоль его подножия.

Результаты определения характеристик состава донного грунта показаны на рис. 2 в виде статистической (фациальной) карты грязевого вулкана Санкт-Петербург и окружающей поверхности с точностью геопозиционных размеров 40 м на пиксель. Синий цвет означает уровень отраженного сигнала –40 дБ, что соответствует глинистым осадочным породам. Сине-зеленый цвет (–35 дБ) указывает на крупнозернистый грунт и ил. Зеленые области отражают сигналы –30 дБ и указывают на суглинки, а красно-зеленые (–25 дБ) и красные (–20 дБ) — на чистый песок и обломки более крупной фракции соответственно. Полученные данные и изображение позволяют предположить, что грязевой вулкан в основном состоит из глины с возможным вкраплением крупных обломков (до

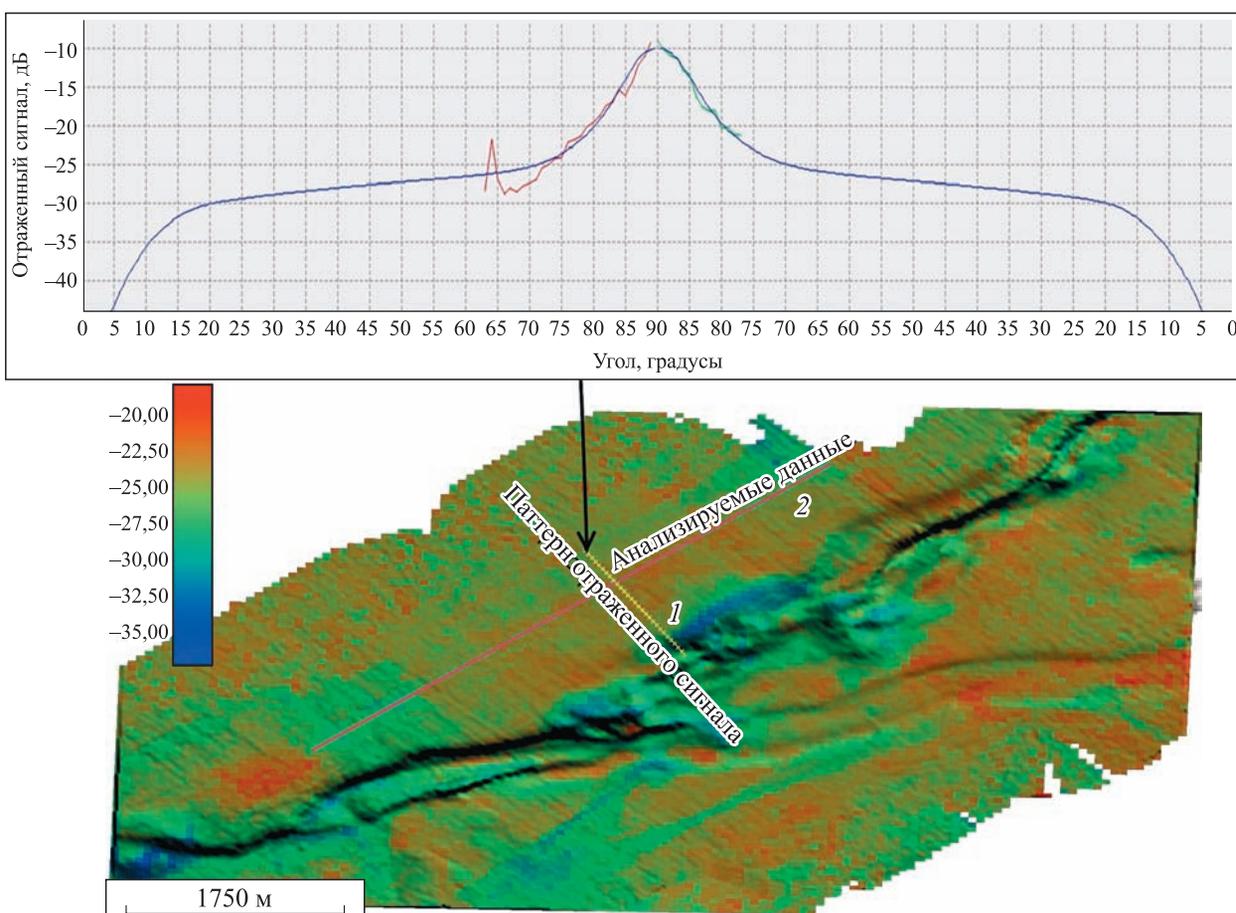


Рис. 2. Результирующая карта фаций, градуированная по уровням серого цвета (GLCM), построенная для грязевого вулкана Санкт-Петербург (нижняя панель), и пример моделируемой кривой акустического отклика (верхняя панель).

1 — расположение диаграммы направленности для показанного примера; 2 — траектория движения корабля.

10 см). На донной поверхности вокруг вулкана также встречаются крупные обломки, но доминируют песчаные, глинистые и илистые отложения. С помощью использованной для исследования аппаратуры невозможно определить морфологические особенности обломков (окатанные они или нет) и отнести их к галечникам или щебню. Приблизительно определяются только размеры обломков.

В колонке, отобранной в районе вулкана [14], были обнаружены сверху вниз диатомовые илы, песчано-алевритовые глины, многочисленные тонкие прослои мелкозернистого песка (турбидиты) и слои, содержащие газогидраты. Наши данные по характеру осадков в районе вулкана подтверждают также материалами Е.Г. Вологиной с соавторами [15]. Три колонки, полученные ими и содержащие песчаные, песчано-алевритовые отложения и турбидиты, оказались расположенными вблизи вулкана, одна из них на поднятом крыле разлома, вторая — на опущенном крыле у подножия уступа и третья колонка, сложенная турбидитами, — на дне каньона.

Следует отметить, что впервые глубоководные выходы газа в районе вулкана Санкт-Петербург были зарегистрированы в сентябре 2005 г. [16]. В настоящее время это самый глубокий (около 1400 м) выход газа со дна оз. Байкал. По нашим данным, в водной толще в районе вулкана (рис. 3, а) обна-

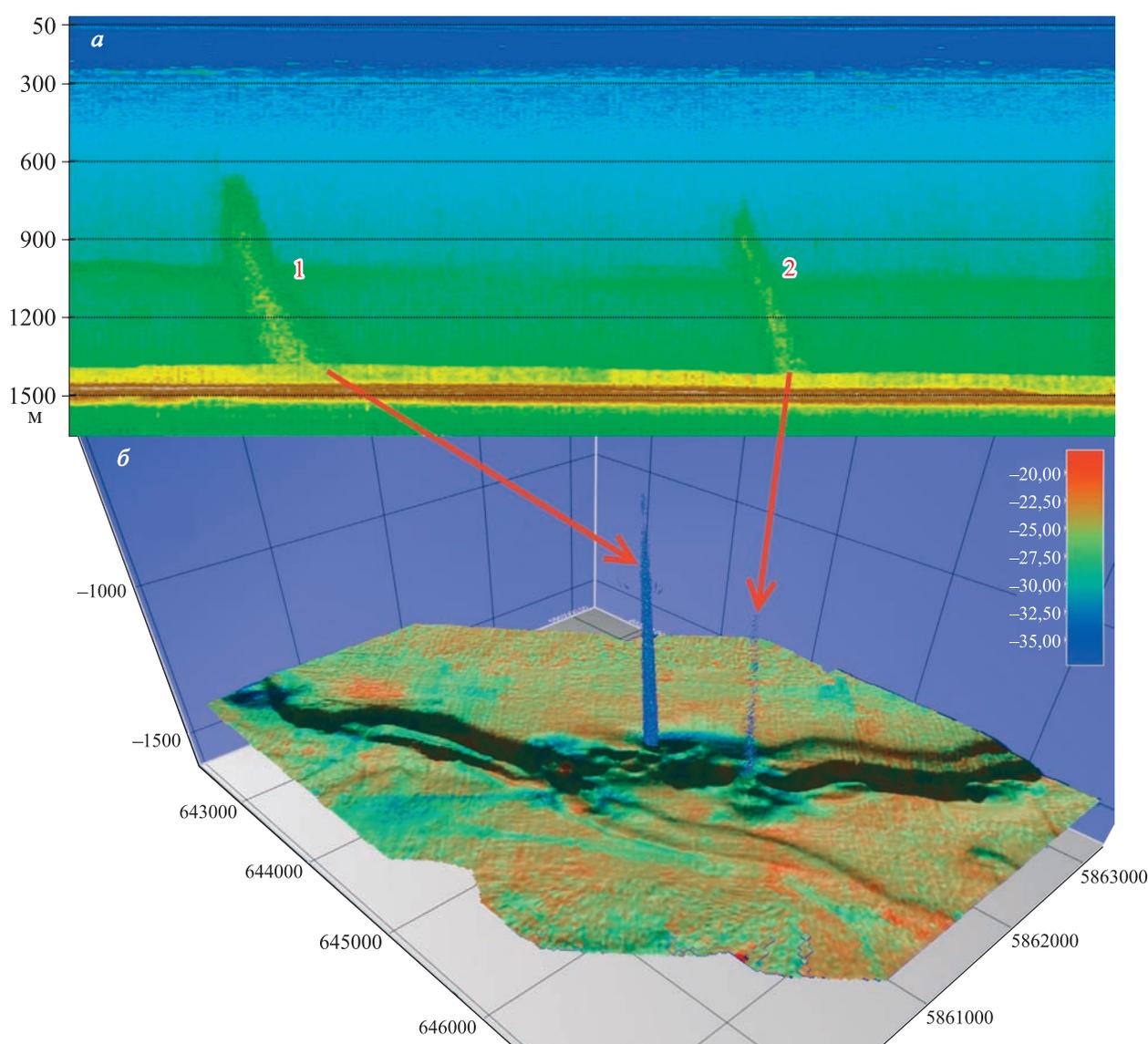


Рис. 3. Изображения данных водной толщи, полученные в центральной котловине озера Байкал над вулканом Санкт-Петербург.

а — выходы газа (1 и 2) в вертикальной перспективе; б — трехмерная ЦМР региона.

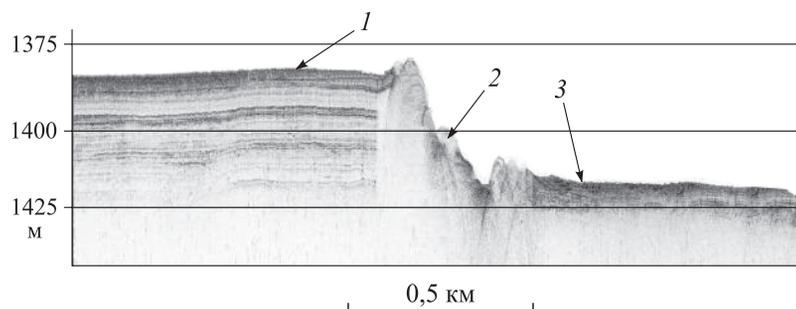


Рис. 4. Сейсмоакустический профиль, полученный в районе грязевого вулкана Санкт-Петербург.

1 — поднятое крыло тектонической ступени; 2 — сместитель разлома; 3 — опущенное крыло тектонической ступени.

ружены две газовые струи с площадью основания 0,022 и 0,016 км<sup>2</sup> (поперечные размеры около 120 и 100 м). Их наблюдаемые высоты составляют 800 и 700 м соответственно. В первом газовом факеле общее количество пузырьковых образований, отразивших сигнал, оказалось в 25 раз больше, чем во втором (62 029 и 2449 соответственно). Количество отражений у дна в слое толщиной 1 м, отнесенное к площади основания газовой струи, у первого факела в семь раз больше, чем у второго. Таким образом, можно судить о значительно большей интенсивности выхода газа у первого сипа. По опубликованным данным [17], высота сипа варьируется от 500 до 960 м. В ходе экспедиционных работ 19 июля 2012 г. было зафиксировано еще одно извержение газа в данном районе, причем исследования показали, что выход газа мог сместиться вдоль разлома на 3 км от первоначальных координат. Координаты обнаруженного нами выхода газа с номером 1 (см. рис. 3, а) совпадают с координатами, определенными в 2005 г., но отличаются от результатов 2012 г. Второй обнаруженный выход газа, находящийся на расстоянии около 1 км в направлении на северо-восток от первого, ранее не фиксировался. На сейсмограмме (рис. 4) поперечного профиля участка дна в районе разлома вблизи вулкана прекрасно видно, что разлом рассекает вулканическую постройку. На профиле частично прослеживаются подводящие каналы, обрамленные плотными осадками (возможно, глиной), через которые происходит выход газа. В полученных образцах донных отложений в районе вулкана была определена грязевулканическая брекчия с содержанием газогидратов [18]. Это указывает на то, что разлом не только способствует формированию особой морфологии современных построек грязевых вулканов, но и поддерживает грязевулканическую активность указанной структуры.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования в районе грязевого вулкана Санкт-Петербург с использованием анализа высокодетализованной ЦМР и результатов гидроакустических измерений показали, что вулкан является структурой, состоящей из нескольких фрагментов, удаленных друг от друга на расстояние до 1200 м. Фрагменты представляют собой грядобразные формирования высотой в несколько метров, пересекающие полость Гидратного разлома и располагающиеся на поднятом и опущенном крыльях разлома. Сам грязевой вулкан в основном состоит из глины с возможным вкраплением обломков. Выходы газа расположены на обоих концах вулкана. Предположительно, одной из причин обильного газовыделения на таких глубинах может быть грязевулканическая брекчия с содержанием выходящих на поверхность газогидратов.

Полученная с помощью ЦМР визуализация геоморфологических особенностей рельефа подчеркивает неоспоримое преимущество комплексного использования различных гидроакустических инструментов. Объединение батиметрических карт, сейсмограмм профилографа, данных обратного рассеяния и водяного столба дает обширную информацию о рельефе дна и составе верхней части осадочного слоя.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Иркутского национального исследовательского технического университета (01-ФПК-19).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузо С. Первые исследователи глубин Байкала // Вост.-Сиб. правда, 1951 [Электронный ресурс]. — <http://www.magicbaikal.ru/history> (дата обращения 20.08.2020).
2. Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Минами Х., Казаков А.В., Хабубев А., Губин Н.А., Ченский А.Г. Новые данные о рельефе подводного южного склона Южно-Байкальской котловины // География и природ. ресурсы. — 2018. — № 1. — С. 59–65.
3. Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Минами Х., Казаков А.В., Хабубев А.В., Губин Н.А., Ченский Д.А., Ченский А.Г., Сутурин А.Н. О рельефе и генезисе подводной возвышенности Муринская банка (Южный Байкал) // География и природ. ресурсы. — 2016. — № 5. — С. 109–116.
4. Khlystov O.M., Minami H., Nachikubo A., Yamashita S., Batist M., Nauds L., Khabuev A.V., Chenskiy A.G., Gubin N.A., Vorobyeva S.S. Age of mudbreccia from mudvolcanoes in academicians ridge, Lake Baikal // Geodynamics & Tectonophysics. — 2017. — Vol. 8, N 4. — P. 923–932.
5. Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Хабубев А.В., Белоусов О.В., Губин Н.А., Соловьева М.А., Наудс Л. Геолого-геоморфологические особенности Посольской банки и Кукуйской гривы озера Байкал // Геология и геофизика. — 2016. — Т. 5, № 12. — С. 2229–2239.
6. Gubin N.A., Grigorev K.A., Poletaev A.S., Chensky A.G. Combined hydroacoustic research of Lake Baikal // Journ. of Physics: Conference Series. — 2021. — N 1728. — P. 1–6.
7. Jackson D.R., Richardson M.D. High-frequency seafloor acoustics // The Underwater Acoustics Series. — New York: Springer, 2007. — 634 p.
8. Wyllie K., Weber T.C., Armstrong A.A. A Review of Wreck Least Depths. // US Hydrographic Conference. National Harbor, Maryland, 2015 [Электронный ресурс]. — <https://scholars.unh.edu/ccom/17> (дата обращения 10.11.2021).
9. Шерстянкин П.П., Алексеев С.П., Абрамов А.М., Ставров К.Г., Де Батист М., Хус Р., Де Канальс М., Касамор Х.Л. Батиметрическая электронная карта озера Байкал // ДАН. — 2006. — Т. 408, № 1. — С. 102–107.
10. Khlystov O.M. Gas hydrate bearing capacity and tectonics of Central Baikal // VII International Conference on Marine Research and Education. — 2018. — Vol. 2. — P. 43–44.
11. Solovyeva M.A., Akhmanov G.G., Mazzini A., Khabuev A.V., Khlystov O.M. The Gydratny Fault zone of Lake Baikal // Limnology and Fresh Water Biology. — 2020. — N 1. — P. 368–373.
12. Видишева О.Н., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А., Мащини А., Хлыстов О.М., Егошина Е.Д., Кудаев А.А., Корост К.В., Полудеткина Е.Н., Морозов Н.В., Григорьев К.А. Особенности разгрузки углеводородных газов вдоль разлома Гидратный (озеро Байкал) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология. — 2021. — № 3. — С. 3–16.
13. Khabuev A.V., Solovyeva M.A., Gubin N.A., Chensky A.G., Akhmanov G.G., Khlystov O.M. The structure of the mudvolcano Novosibirsk based on the results of geological and geophysical studies // Limnology and Freshwater Biology. — 2020. — N 4. — P. 922–923.
14. Krylov A.A., Nachikubo A., Minami H., Pogodaeva T.V., Zemskaia T.I., Krzhizhanovskaya M.G., Poort J., Khlystov O.M. Authigenic rhodochrosite from a gas hydrate-bearing structure in Lake Baikal // International Journ. of Earth. 2018 [Электронный ресурс]. — <https://doi.org/10/1007/s00531-018-1584-z> (дата обращения 10.08.2020).
15. Vologina E.G., Sturm M., Radziminovich Y.B. Traces of high seismic activity in the uppermost sediments of Lake Baikal, Siberia // Geodynamics & Tectonophysics. — 2021. — Vol. 12, issue 3. — P. 544–562.
16. Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatovsky R.Y. Gas seeps in Lake Baikal — detection, distribution, and implications for water column mixing // Geo-MarLett. — 2010. — Vol. 30. — P. 399–409.
17. Makarov M.M., Muyaikhin S.I., Kucher K.M., Aslamov I.A., Gnatovsky R.Y., Granin N.G. Bubble gas escapes from the bottom of Lake Baikal, dependence of gas flare height on methane flux // Fundamental and Applied Hydrophysics. — 2016. — Vol. 9, N 3. — С. 32–41.
18. Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М. Проект class@baikal: развивая традиции международной программы «Обучение-через-исследование (плавающий университет)» // Сборник трудов IV Междунар. науч.-практ. конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU)». — 2015. — С. 29–33.

*Поступила в редакцию 19.06.2021*

*После доработки 20.12.2021*

*Принята к публикации 29.03.2022*