

УДК 551.465

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВБЛИЗИ ОСТРОВА БЕННЕТА ПО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2025 г. В. Г. Гайнанов<sup>1, \*</sup>, А. С. Зверев<sup>2, \*\*</sup>, Ли Гогуй<sup>1, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Геологический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН,  
Москва, Россия,

\*e-mail: gainan@yandex.ru

\*\*e-mail: sparker1@yandex.ru

\*\*\*e-mail: lig@my.msu.ru

Поступила в редакцию 19.03.2024 г.

После доработки 11.04.2024 г.

Принята к публикации 22.11.2024 г.

Остров Беннетта, один из наименее изученных островов Восточной Арктики, расположен в северной части Новосибирского архипелага между морями Лаптевых и Восточно-Сибирским и относится к группе островов Делонга. В статье представлены некоторые результаты обработки и интерпретации сейсмоакустических данных высокого разрешения, полученных в 78-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2019 г. Анализ сейсмоакустических разрезов позволил проследить по всей площади исследований границу несогласия между древними коренными и молодыми слабо консолидированными отложениями. Обнаружено относительно глубокое палеорусло ледникового происхождения, находящееся в предположительном продолжении известной в южной части острова долины. К юго-востоку от острова обнаружены скопления мелкозалегающего газа в осадках. На сейсмическом разрезе к северо-западу от острова наблюдается тектонически раздробленный участок коренных отложений, с которым может быть связано образование наблюдаемых на спутниковых снимках паро-газовых шлейфов.

**Ключевые слова:** сейсмоакустическое профилирование, газовые шлейфы, граница несогласия, коренные отложения, молодые отложения, палеорусло, скопления газа

DOI: 10.31857/S0030157425040122

### ВВЕДЕНИЕ

Остров Беннетта (рис. 1) открыт в 1881 г. американским мореплавателем Д.В. Де-Лонгом и назван в честь организатора полярной экспедиции — Джеймса Гордона Беннетта [9]. С о. Котельный Яков Санников, а через много лет и Эдуард Толль, в 1886 и 1893 г., видели землю на севере. То, что видели в восточной стороне, оказалось островом Беннетта, а то, что видели с западной стороны — Землей Санникова, которую так и не нашли.

Судьба первых исследователей острова оказалась трагичной — судно Де-Лонга было зажато льдами и быстро утонуло, члены экспедиции добрались до острова пешком по льдинам, но погибли при попытке выбраться на материк. Аналогичной оказалась судьба Первой Русской полярной экспедиции 1900 г. под руководством барона

Эдуарда Толля на шхуне “Заря”. В Санкт-Петербурге ее провожал сам Император России Николай Второй. Члены экспедиции побывали на о. Беннетта и исследовали его, но погибли на обратном пути на материк.

В 1902 г. на поиски пропавшей экспедиции Толля направился молодой лейтенант А.В. Колчак, в будущем адмирал. Колчак исследовал о. Беннетта, где обнаружил записку Э. Толля и оставленные его группой коллекции горных пород. Экспедиция Колчака оказалась первой успешной экспедицией — она доставила научной общественности не только результаты своих исследований, но и результаты исследований Э. Толля.

Трагическая судьба первых исследователей острова объясняется тем, что остров в те времена

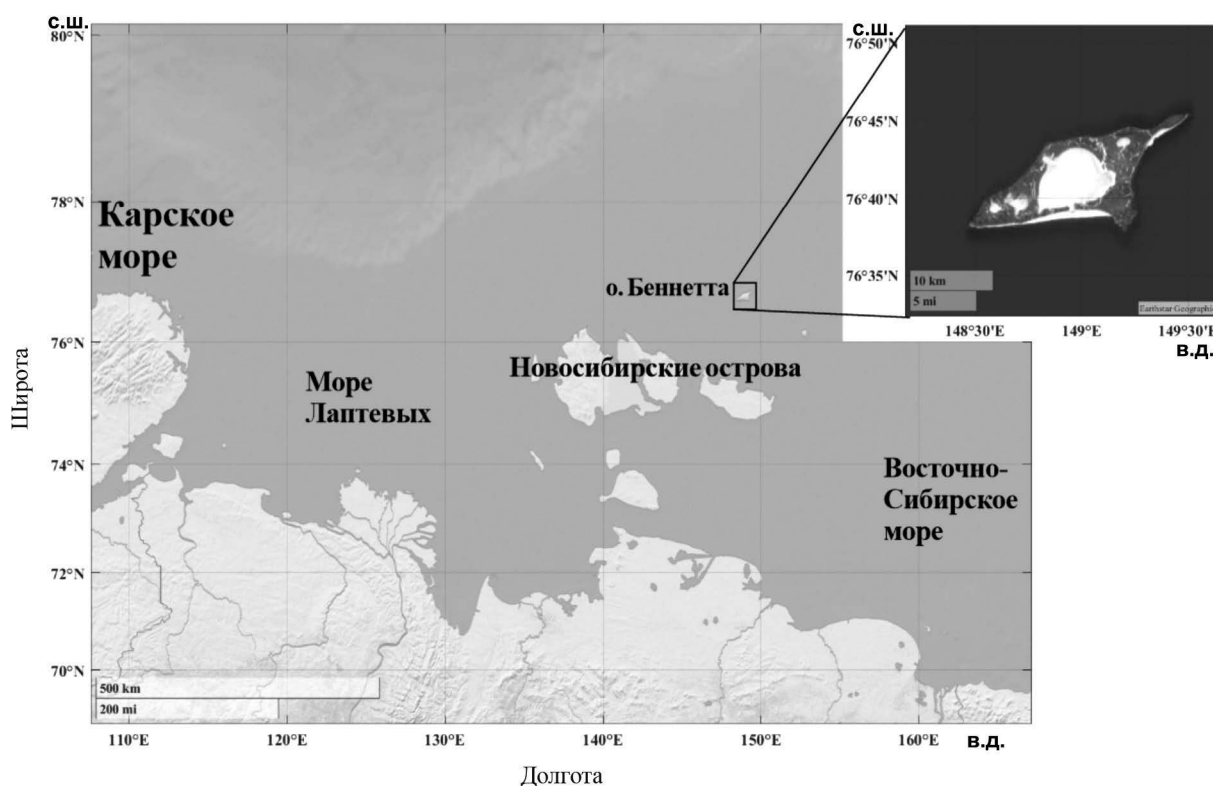


Рис. 1. Географическое положение Острова Беннетта.

был практически недоступным ни зимой, ни летом. Летом море было большей частью покрыто льдами, что делало остров недоступным для судов, а зимой, несмотря на суровость климата, ледовый покров не был сплошным, существовали полыньи, которые можно было преодолеть только на лодках, что в условиях полярной ночи такое предприятие делало чрезвычайно опасным.

Следует заметить, что в настоящее время, в связи с глобальным потеплением, воды вокруг острова летом полностью очищаются ото льдов (рис. 2а) и к острову можно подплыть даже на надувных катамаранах [10].

В СССР интерес к поискам неизвестной земли возродил известный ученый-геолог и палеонтолог, академик В.А. Обручев в научно-фантастическом романе “Земля Санникова” [5], однако землю так и не нашли.

Вновь внимание к о. Беннетта возродили обнаруженные, начиная с 1983 г., на спутниковых снимках шлейфы неизвестного происхождения (рис. 2б), вытянутые в северо-западном направлении от острова. Сначала думали, что они имеют метеорологическую природу, но в последующем в их составе были найдены компоненты вулканических и гидротермальных извержений. Представленный здесь снимок (рис. 2б) сделан метеорологическим спутником с относительно

высокой разрешающей способностью 250 м. На нем видна большая полынья вдоль северо-западного берега острова (снимок представлен так, как был снят, без привязки к карте). Исследователи объясняют белое облако как скопление микрочастиц льда, т. е. пар выделяется из нагретой воды и превращается в микрочастицы льда (кстати, видна тень от этого облака). Таким образом, современная активность с образованием газовой-паровых шлейфов происходит в относительно высокотемпературной среде ныне действующей гидротермальной системы [4, 7].

Интересное совпадение — в романе Обручева Земля Санникова описывается как фантастический оазис, согреваемый теплом вулканов. Остров не нашли, но гидротермальная система, оказывается, существует.

В 2019 г., в 78-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (Начальник экспедиции член-корр РАН И.П. Семилетов) [6], в рамках комплексной океанографической экспедиции в арктических морях России, ГЕОХИ РАН были проведены сейсмические исследования вокруг о. Беннетта в Восточно-Сибирском море. Целью работ было изучение геологического строения верхней части разреза на шельфе острова, чтобы получить ответы на вопросы о продолжении обнажающихся на острове пород и структурных элементов под

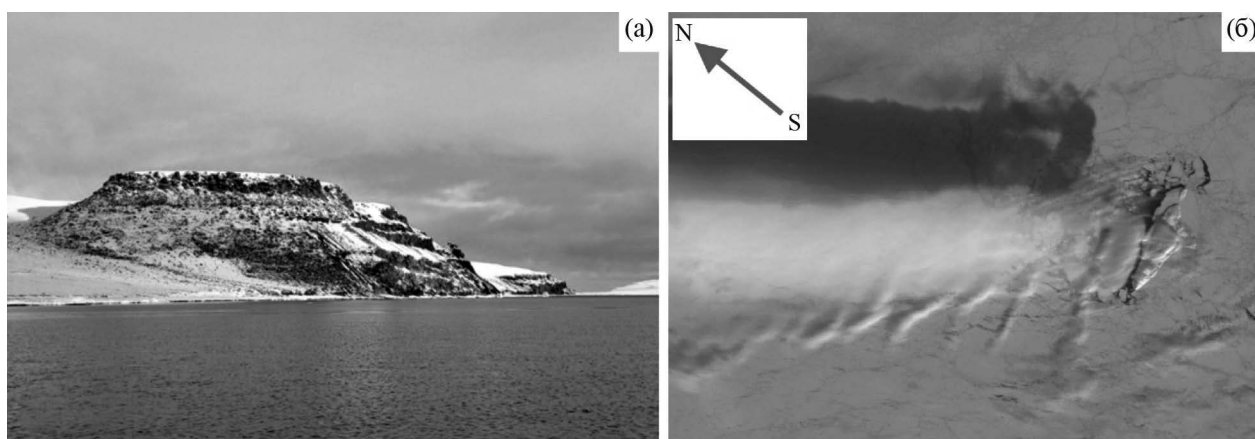


Рис. 2. Остров Беннетта: а — вид с моря [9]; б — атмосферный шлейф от острова [7].

водой на шельфе и о природе газовых шлейфов. Во время рейса вокруг о. Беннетта были собраны одноканальные и многоканальные сейсмоакустические данные высокого разрешения. ГЕОХИ РАН любезно предоставил нам эти данные.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ОСТРОВА

О. Беннетта сложен слоями осадочных и вулканических пород раннепалеозойского, позднемелового, плиоценового и четвертичного геологических возрастов (рис. 3). В геологическом разрезе о. Беннетта кембрийско-ордовикская часть имеет флишевое строение без явных примесей вулканического материала. Отложения состоят из толщи аргиллитов толщиной примерно 500 м с небольшим количеством алевролитов и известняков. Палеозойские породы перекрыты позднемеловыми угленосными аргиллитами и кварцитоподобными песчаниками, а также базальтовыми лавами и туфами с линзами туфоаргиллитов. Позднемеловые толщи перекрыты базальтовыми лавами возрастом от плиоцена до четвертичного периода. Наиболее поздние четвертичные вулканические породы образуют небольшие вулканические конусы [3, 9]. Следует заметить, что приведенные здесь сведения по геологии острова имеют только ознакомительный характер, так как наши сейсмоакустические профили проходят относительно далеко от острова, и выделяемые на них отражающие границы не могут быть непосредственно связаны с обнажающимися на острове породами.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При выполнении сейсмоакустических исследований НИС “Академик Мстислав Келдыш”

подошел к о. Беннетта с запада, прошел вдоль южного берега и обогнул остров против часовой стрелки, выполнив 4 профиля (рис. 3). Профиль 4 на схеме не показан, так как по сути он повторяет профиль 1. Красной штриховой линией показаны интервалы профилей, примеры интерпретации которых показаны на соответствующих рисунках 7–9.

Сейсмоакустическое профилирование выполнялись с применением комплекса “Геонт-Шельф” с электроискровым источником (спаркером), одноканальной косой длиной 10 м и 16-канальной сейсмической косой шагом 2 м между каналами. Частотный диапазон возбуждаемых колебаний находился в пределах 40–2400 Гц. Данная технология в исследуемом районе позволила достичь глубинности около 100 м при разрешающей способности 2–3 м.

### ОБРАБОТКА СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

На предварительных сейсмоакустических разрезах из-за высокого уровня шумов и многократных волн были видны лишь отдельные фрагменты отражающих границ (рис. 4а). Для увеличения отношения сигнал/помеха мы применили разные способы обработки как одноканальных, так и многоканальных данных. После обработки значительно улучшилось отношение сигнал/помеха и отчетливо стали видны геологические структуры (рис. 4б).

Из множества примененных нами процедур обработки здесь остановимся лишь некоторых, оказавшихся наиболее эффективными для наших данных.

**Фильтрация на F-K плоскости.** После частотной фильтрации уровень шумов на сейсмограммах существенно уменьшился, однако на



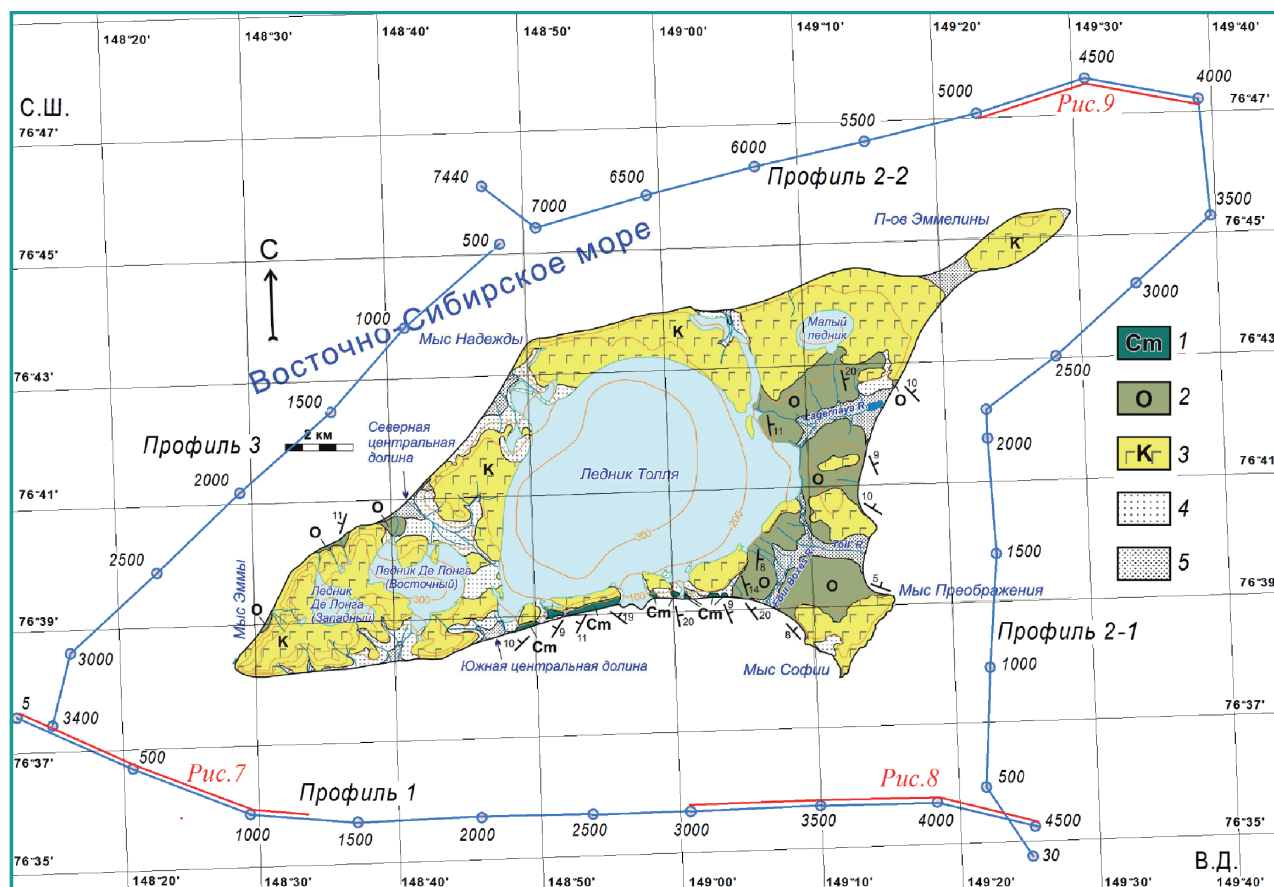


Рис. 3. Остров Беннетта [3] и сейсмоакустические профили. Возраст и состав отложений: 1 – Кембрий, 2 – Ордовик, 3 – Апт-альбские базальты, 4 – Морена, 5 – Четвертичные.

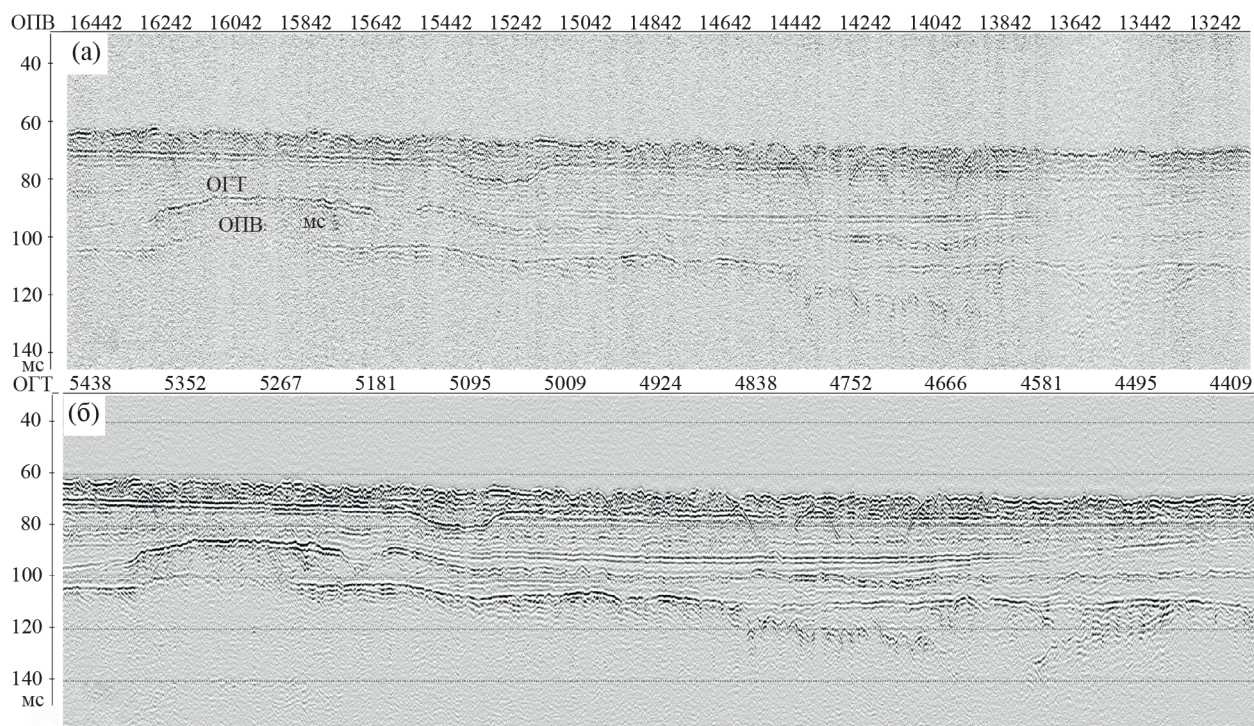


Рис. 4. Фрагмент сейсмоакустического разреза до (а) и после обработки (б).



сейсмограммах общего пункта возбуждения (ОПВ) хорошо видны многократные волны и шумы от судна, образующие оси синфазности с определенным наклоном (рис. 5а). Для подавления шумов от судна мы использовали двухмерную частотную фильтрацию на F-K плоскости (рис. 5б, в).

**Подавление многократных волн.** На исследуемой площади глубина воды небольшая, поэтому многократные волны в водном слое существенно мешают прослеживанию целевых отражающих границ. Поскольку разность скоростей сейсмических волн в верхних частях разрезах очень мала,

разделение многократных и однократных волн при суммировании по ОГТ, а также пространственно-временной фильтрацией не дают должного эффекта (рис. 6а) [1, 8]. Эффективно подавить многократные волны удалось применением способов, основанных на моделировании и вычитании многократных волн (рис. 6б) [11].

В представленном на рис. 6 фрагменте временного разреза хорошо видно, что двухкратная и трехкратная волны, отраженные от дна моря, после применения этих способов значительно подавились, то же самое произошло и с многократными волнами от геологических границ под

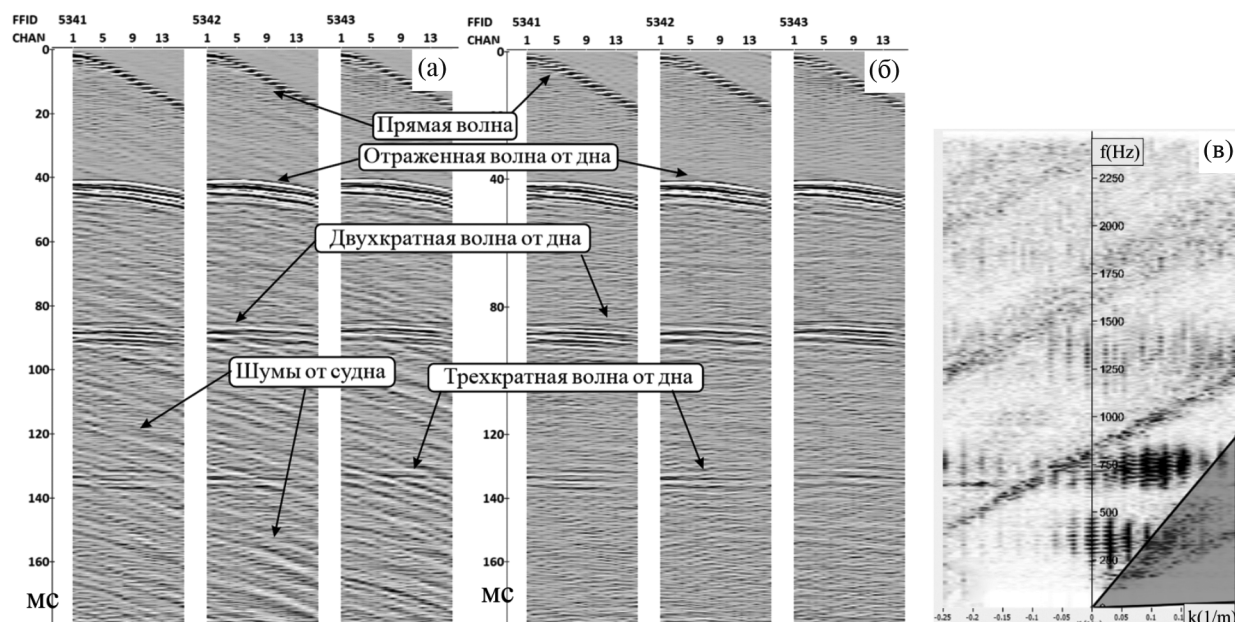


Рис. 5. Сейсмограммы ОПВ после частотной фильтрации — многократные волны и шумы от судна не подавились (а); те же сейсмограммы после F-K фильтрации — шумы от судна заметно ослабились (б); F-K спектр сейсмограмм (в) — красный треугольник показывает вырезаемую часть спектра.

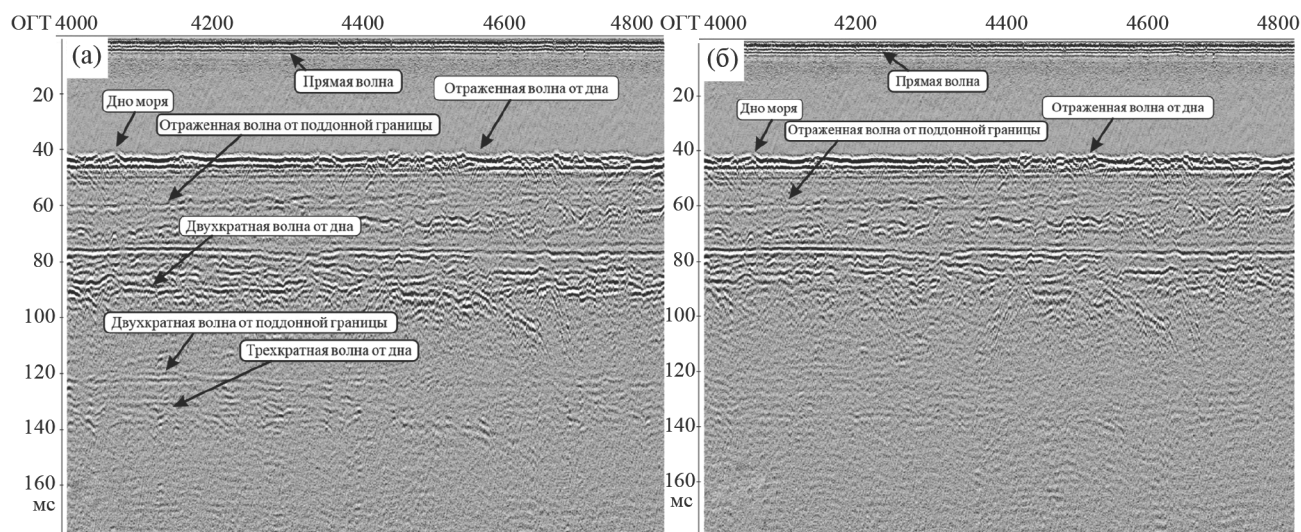


Рис. 6. Фрагмент суммированного по ОГТ временного разреза: а — до подавления кратных волн; б — после подавления кратных волн.



морским дном. Благодаря этому на сейсмических разрезах уверенно стала прослеживаться граница несогласия (рисунки 7–9).

Подводя итог обработки сейсмических данных, можно сказать, что выбранный нами граф обработки позволил получить четкие временные разрезы, на которых значительно улучшилось отношение сигнал/помеха и отчетливо стали видны геологические структуры.

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

На полученных сейсмических разрезах глубинность не превышает 100 м под дном, поэтому по ним нельзя судить о глубинном строении района, а в отсутствии скважинной информации вблизи

наших профилей невозможна стратиграфическая привязка отражающих границ. Тем не менее некоторые характерные черты строения геологического разреза можно рассмотреть, а именно, по всем профилям четко выделяются два структурных этажа, разделенных ярко выраженной субгоризонтальной границей несогласия (рисунки 7–9). Под этой границей можно видеть косую слоистость и дислоцированность отложений. Эта граница является также сильной отражающей границей положительной полярности. По этим признакам толщу коренных отложений ниже этой границы можно считать кристаллическим фундаментом, который сложен консолидированными породами раннепалеозойского и поздне мелового возрастов, обнажающихся на самом острове [3, 9].

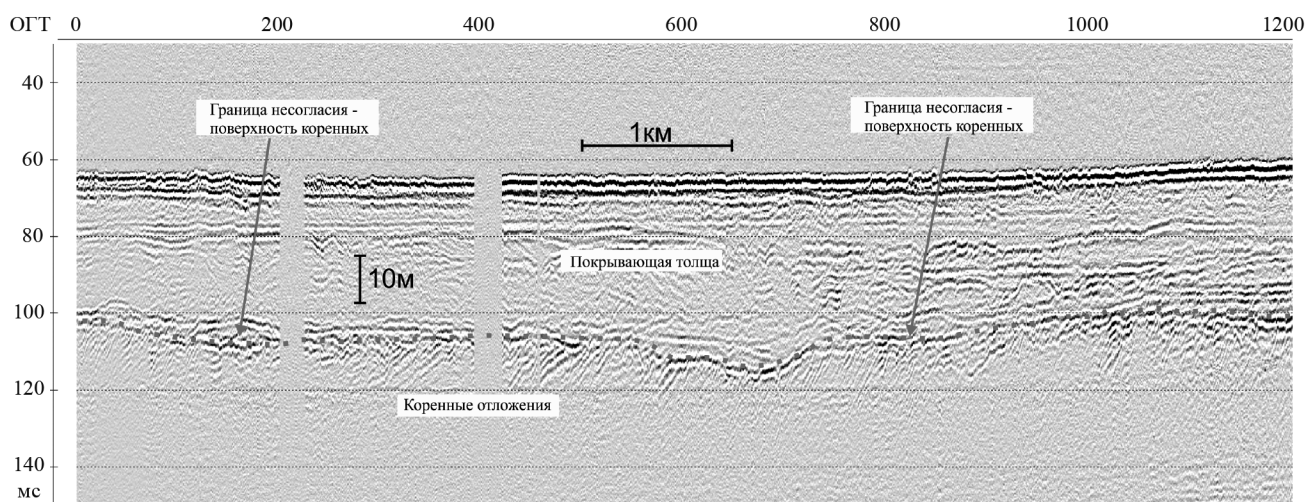


Рис. 7. Временной разрез для интервала ОГТ 0–1200 по профилю 1. Четко выделяется граница несогласия между консолидированными коренными отложениями и слабо консолидированной молодой покрывающей толщей.

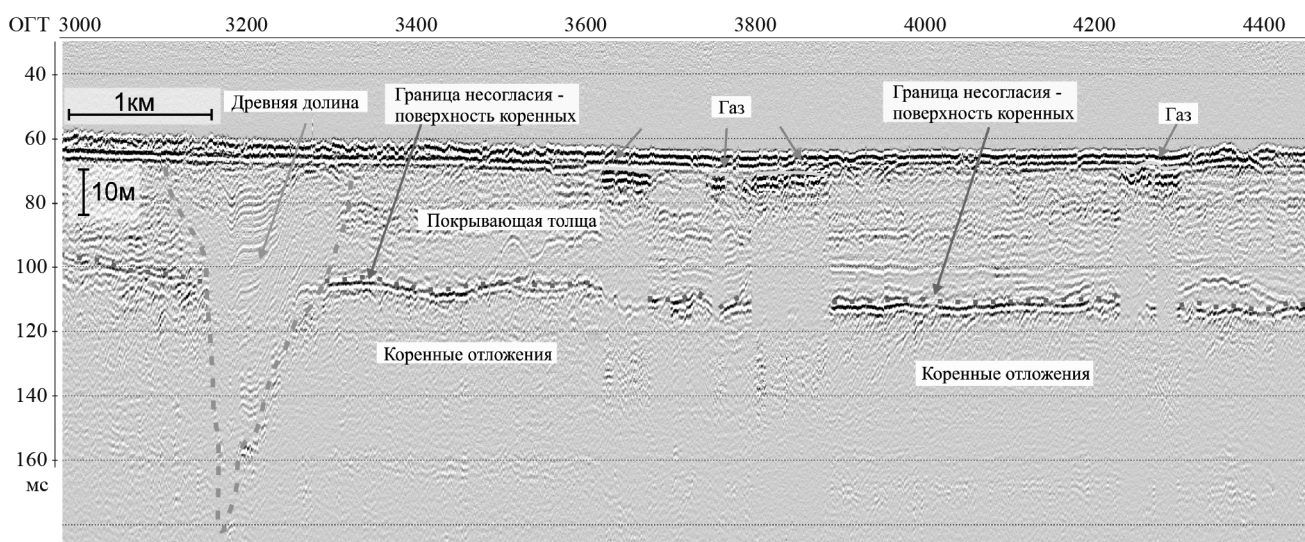


Рис. 8. Временной разрез для интервала ОГТ 3000–4500 по профилю 1. Выделяется древняя захороненная долина (ОГТ 3050–3350), “яркие пятна” — индикаторы скоплений газа (ОГТ 3600–4200).



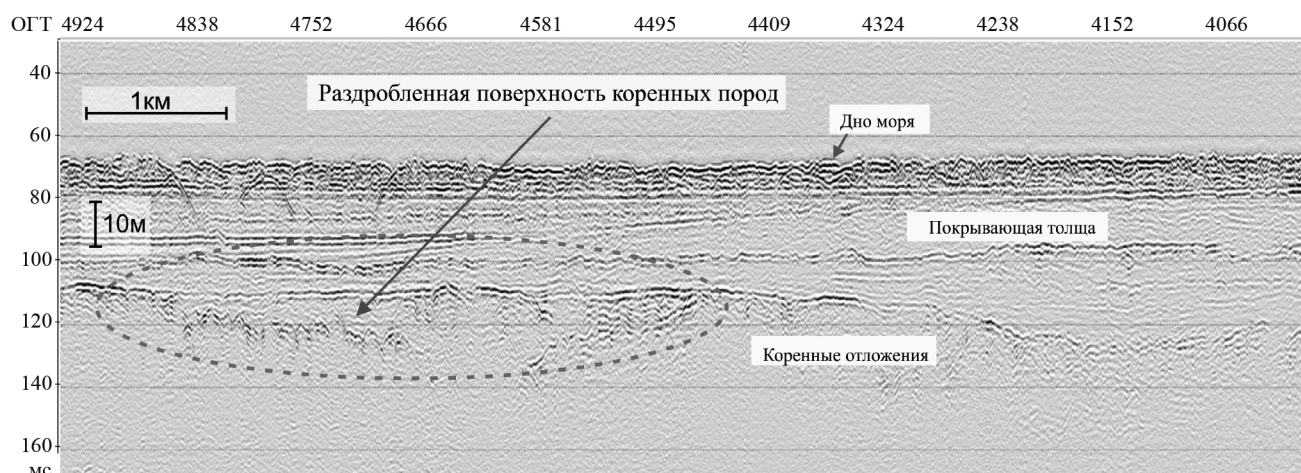


Рис. 9. Раздробленная поверхность коренных пород в интервале профиля 2–2.

Выше залегает толща отложений мощностью 40–60 м, которая, судя по относительно низким значениям пластовых скоростей — 1600–1800 м/с — является слабо консолидированной. Внутри толщи наблюдается либо хаотический рисунок сейсмозаписи, либо толща имеет косо-слоистое строение, либо в толще фиксируются различные несогласные границы. Все это говорит о том, что толща формировалась в субэвральных обстановках, либо на мелководье.

В интервале ОГТ 3100–3270 по профилю 1 наблюдается древняя захороненная долина (рис. 8). Она расположена к югу от острова, ее ширина на пересечении с сейсмическим профилем составляет около 1500 м, общая глубина вреза около 100–120 м. Причем врез присутствует как в древней консолидированной толще (около 80 м по глубине), так и в молодой покрывающей толще (примерно 40 м по глубине). V-образная форма долины говорит о его ледниковом происхождении, а ее расположение недалеко от о. Беннетта позволяет предполагать, что ледник сползал с острова. Характер слоистости в материале заполнения указывает на осадконакопление в условиях локального бассейна [2].

На этом же фрагменте временного разреза в интервале глубин 30–50 м под дном отчетливо прослеживается граница регионального несогласия, под которой хорошо видна косая слоистость, соответствующая ранним коренным отложениям.

Далее по этому же интервалу разреза по профилю 1, в окрестностях ОГТ 3600, 3800 и 4250 на небольшой глубине под дном выделяются скопления газа — отражения от кровли газа характеризуются высокой амплитудой и отрицательной полярностью и скрывают отражения от стратиграфических границ под ней (рис. 8).

Аналогичные амплитудные аномалии — индикаторы скоплений газа, прослеживаются и на разрезах в начале профиля 2. На других интервалах профилей такие аномалии не были замечены, что позволяет утверждать, что именно на этой части исследуемой площади к юго-востоку от острова сосредоточены малоглубинные скопления газа в осадках. Однако эти скопления газа вряд ли могут быть связаны с наблюдаемыми на спутниковых снимках газово-паровыми шлейфами.

На наш взгляд, такая связь может существовать с наблюдаемой на сейсмическом разрезе к северо-западу от острова тектонической раздробленностью коренных отложений с одновременным понижением рельефа их поверхности (рис. 9). Обнаруженные на спутниковых снимках шлейфы газа берут начало с этого же участка поверхности. Такое совпадение может быть случайным.

## ВЫВОДЫ

Качество сейсмоакустических разрезов удалось существенно улучшить с использованием различных способов обработки данных, после чего стали видны характерные черты строения верхней части геологического разреза.

В отсутствии скважинной информации стратиграфическая привязка отражающих границ была невозможна, тем не менее удалось выделить и проследить границу регионального несогласия между древними коренными породами и молодой осадочной толщей.

Выделена палеодолина, предположительно ледникового происхождения, расположенная в море к югу от острова, к юго-востоку от острова в отдельных интервалах профилей обнаружены скопления газа в верхней части осадочного чехла.



В интервале сейсмического разреза к северо-востоку от острова поверхность коренных отложений подвержена некоторым тектоническим дислокациям. Обнаруженные на спутниковых снимках шлейфы газа берут начало с этого же участка поверхности. Такое совпадение может быть неслучайным.

**Источники финансирования.** Работа выполнена по госзаданию ГЕОХИ РАН, тема 0137-2019-0007.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайнанов В.Г. Методы сейсмоакустических исследований на акваториях. М.: ООО "ЕАГЕ Геомодель", 2019. 146 с.
2. Гайнанов В.Г., Поляк Л.В., Гатауллин В.Н., Зверев А.С. Сейсмоакустические исследования следов покровных оледенений в Карском море // Вестник МГУ, Серия Геология, 2005. № 1. С. 38–44.
3. Данукалова М.К. Геологическая история территории островов Беннетта и Котельный в раннем палеозое: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2016. 179 с.
4. Масуренков Ю.П., Слезин Ю.Б., Собисевич А.Л. Газовые шлейфы у острова Беннетта // Известия РАН. Серия географическая. 2013. № 3. С. 86–95.
5. Обручев В.А. Земля Санникова или Последние онкилоны. М.: Пучина, 1926. 325 с.
6. Семилетов И.П. Основные результаты комплексной межрегиональной экспедиции на НИС "Академик Мстислав Келдыш": новые данные об особенностях функционирования геосистем литосфера–гидросфера–криосфера–атмосфера в морях Восточной Арктики // Сборник: Итоги экспедиционных исследований в 2019 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген. Материалы конференции. Севастополь, 2020. С. 51–52.
7. Bennett Island plume. Madison, USA: Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS), University of Wisconsin, 2013.
8. Dondurur D. Acquisition and processing of marine seismic data. Elsevier, 2018. 597 p.
9. Остров Беннетта. URL: <https://ru.wikipedia.org>.
10. <https://www.yakutia.kp.ru>
11. SeisPro 2023.1, Руководство пользователя (редакция от 15.04.2023). М.: ООО "Деко-геофизика СК", 2023. 1024 с.

## GEOLOGICAL STRUCTURE OF MARINE SEDIMENTS AROUND THE BENNETT ISLAND ACCORDING TO THE VERY HIGH RESOLUTION SEISMIC DATA

V. G. Gainanov<sup>a, \*</sup>, A. S. Zverev<sup>b, \*\*</sup>, Li Guogui<sup>a, \*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia,

<sup>b</sup> Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*e-mail: [gainan@yandex.ru](mailto:gainan@yandex.ru)

\*\*e-mail: [sparker1@yandex.ru](mailto:sparker1@yandex.ru)

\*\*\*e-mail: [lig@my.msu.ru](mailto:lig@my.msu.ru)

Bennett Island, one of the least explored islands in the Eastern Arctic, is located in the northern part of the Novosibirsk Archipelago between the Laptev and East Siberian Seas and belongs to the Delong Island group. The article presents some of processing and interpretation results of very high-resolution seismic data obtained on the 78th cruise of the R/V *Akademik Mstislav Keldysh* in 2019. The analysis of seismic sections made it possible to trace the boundary of disconformity between ancient bedrock and young unconsolidated sediments over the entire research area. A relatively deep paleovalley of glacial origin has been discovered, located in the presumed continuation of the valley known in the southern part of the island. Accumulations of shallow gas in sediments were found to the southeast of the island. In the seismic section to the northwest of the island, a tectonically fragmented section of bedrock is observed, which may be associated with the formation of vapor-gas plumes observed on satellite images.

**Keywords:** very high resolution seismic profiling, gas plumes, disconformity boundary, bedrock, young deposits, paleovalley, gas accumulations