

УДК 550.834.05

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-1-123-129

СТРОЕНИЕ ЧЕТВЕРТИЧНОГО ПОКРОВА ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИКИ

Александра Константиновна Миринец¹✉, Александр Евменьевич Рыбалко², Михаил Игоревич Алёшин³, Дмитрий Александрович Субетто⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alexandra.mirinets@gmail.com ✉

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия; Институт водных проблем Севера КНЦ РАН, Петрозаводск, Россия; alek-rybalko@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; maan@ifz.ru

⁴ Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия; Институт водных проблем Севера КНЦ РАН, Петрозаводск, Россия; subetto@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты сейсмоакустических работ, выполненных в Петрозаводской губе Онежского озера, целью которых было изучение верхней части геологического разреза акватории. Сейсмоакустические работы были представлены методом отраженных волн в модификации — сейсморазведка сверхвысокого разрешения. На камеральном этапе данные были обработаны и проинтерпретированы. Удалось выделить пять сейсмокомплексов и увязать их с имеющейся информацией о геологическом строении озера. Итогом работы стало построение карт по всем выделенным пяти отражающим горизонтам, которые охватывают всю Петрозаводскую губу. Удалось оценить распространенность и мощность отложений, отвечающих каждому комплексу.

Ключевые слова: Онежское озеро, четвертичные отложения, сейсморазведка сверхвысокого разрешения, ССВР, сейсмостратиграфический анализ, газ в донных отложениях, покмарки

Для цитирования: Миринец А.К., Рыбалко А.Е., Алёшин М.И., Субетто Д.А. Строение четвертичного покрова Петрозаводской губы Онежского озера по данным сейсмоакустики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 1. С. 123–129.

THE STRUCTURE OF THE QUATERNARY SHEET IN THE PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGA ACCORDING TO SEISMOACOUSTICS

Aleksandra K. Mirinets¹✉, Aleksandr E. Rybalko², Mikhail I. Aleshin³, Dmitriy A. Subetto⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alexandra.mirinets@gmail.com ✉

² St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia; Northern Water Problems Institute KRC, Petrozavodsk, Russia; alek-rybalko@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; maan@ifz.ru

⁴ Herzen University, St. Petersburg, Russia; Northern Water Problems Institute KRC, Petrozavodsk, Russia; subetto@mail.ru

Abstract. We present the results of seismoacoustic works carried out in the Petrozavodsk Bay of Lake Onega, the goal was to study a near-surface geological section. Seismoacoustic investigations were presented by the reflection method in a modification ultra-high resolution seismic survey. During the office work, the data were processed and interpreted, in which five seismic complexes were identified and correlated with the information about the lake structure. The result of the work was the maps construction of all five identified reflecting horizons covering all Petrozavodsk Bay. It was possible to estimate the sediments abundance and thickness corresponding to each complex.

Keywords: Lake Onega, Quaternary sediments, very high resolution seismic survey, VHR, seismic stratigraphy analysis, gas in bottom sediments, pockmarks

For citation: Mirinets A.K., Rybalko A.E., Aleshin M.I., Subetto D.A. The structure if the Quaternary sheet in the Petrozavodsk Bay of Lake Onega according to seismoacoustics. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 1: 123–129. (In Russ.).

Введение. Онежское озеро в большей части расположено в Республике Карелия и является вторым по величине пресноводным водоемом Европы. Изучение озера началось около 60-ти лет назад, когда были выполнены первые исследования при помощи гравитационных трубок. Глубинность таких исследований составляла не более 2,5 м [Subetto et al., 2020]. При участии Московского государствен-

ного университета имени М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургского государственного университета и Института водных проблем Севера РАН в 2016–2019 гг. были выполнены совместные геолого-геофизические работы, целью которых было изучить геологическое строение верхней части разреза озера. Изыскания проводились в Петрозаводской губе и в Заонежском заливе.

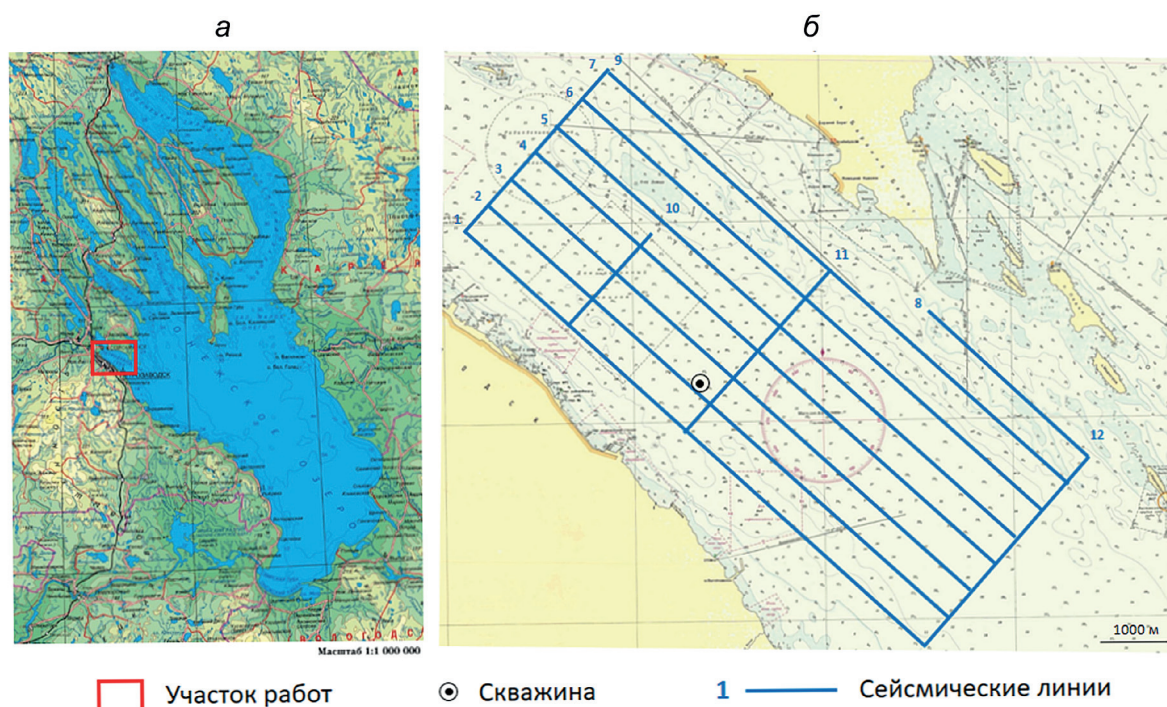


Рис. 1. Физико-географическая карта Онежского озера (а) и обзорная схема района работ в Петрозаводской губе (б)

На данный момент имеется некоторое количество публикаций, посвященных результатам исследований 2016–2019 гг. Так в статье [Aleshin et al., 2019] были проанализированы данные акустического профилирования и гидролокации бокового обзора. В работе [Valieva et al., 2021] описываются результаты геохимических исследований грунта. На основе данных пробоотбора и сейсмоакустики были построены карты четвертичных отложений Онежского озера, что представлено в публикациях [Рыбалко и др., 2020, Беляев и др., 2021]. В работе [Алешин и др., 2021] оцениваются количественные параметры сейсмоакустического разреза и газонасыщенность в верхней части разреза. В статье [Миринец и др., 2022] представлены примеры совместной интерпретации данных сейморазведки сверхвысокого разрешения (ССВР) и донной электротомографии. В настоящее время вышла из печати монография Субетто Д.А. [Субетто и др., 2022].

В данной статье будут приведены результаты работ, выполненных в Петрозаводской губе сейморазведкой методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки. По частотному диапазону модификация метода соответствует ССВР [СП 504.1325800.2021, 2021].

Петрозаводская губа, рассматриваемая в настоящей работе, представляет собой углубленный в сушу более чем на 19 км северо-западный залив Онежского озера площадью почти 125 км² (рис. 1, а). На юго-западном берегу губы расположена столица республики — г. Петрозаводск [Литвиненко и др., 2013].

Котловина озера находится в тектонической депрессии на стыке Фенноскандинавского кристаллического щита с севера и палеозойских осадочных пород Русской плиты с юга [Филатов, 2010]. Фор-

мирование Онежского озера как крупного приледникового водоема началось около 15 тыс. лет назад в результате таяния ледника, отступающего в северо-западном направлении. В работе [Субетто и др., 2019] были проведены палеогеографические реконструкции уровня озера в позднеледниковье.

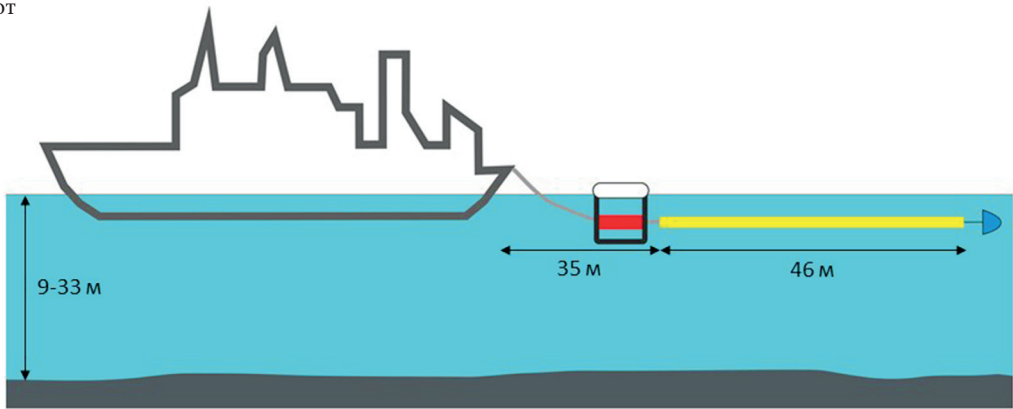
Геологический разрез озера можно разделить на две части: докембрийский фундамент на севере и плитный чехол на юге, которые перекрываются четвертичными отложениями различных генетических типов, распространенных по всей площади озера.

В северной части озера, которая расположена в пределах Фенноскандинавского кристаллического щита, породы архея — протерозоя перекрываются четвертичными отложениями, образующими практически сплошной с различной мощностью (от первых метров до 100 м) покров рыхлых отложений [Беляев и др., 2021]. К западу от г. Петрозаводска были обнаружены моренные гряды, холмы и озы, некоторые из которых имеют северо-западное простирание. Они перекрыты маломощными слоями ледниково-озерных и озерных отложений.

Подробное описание геологического строения озера будет дано дальше при перечислении сеймокомплексов, выделенных при интерпретации сейсмических данных.

Материалы и методы исследований. Максимальные глубины озера достигают не более 30–35 м. Для покрытия всей губы были проложены линии, как указано на рис. 1, б. Работы проводились с НИС «Эколог». Сейморазведочные работы выполнялись методом 2D-ССВР [Токарев, 2016] с приповерхностной буксируемой приемно-излучающей системой (рис. 2).

Рис. 2. Схема выполнения работ



В качестве излучателя был использован электроискровой источник (спаркер). Поскольку вода в Онежском озере ультрапресная (на момент выполнения работ сопротивление воды составляло около 170 Ом·м), спаркер был помещен в контейнер с подсолонной водой. Энергия подавалась на спаркер высоковольтным блоком Applied Acoustics CSP-P. Количество электродов на спаркере — 100, центральная частота сигнала — 600 Гц, интервал возбуждения сигнала — 1 с, энергия — 1000 Дж. Сейсмическая 24-канальная коса SplitMultiSeis с шагом 2 м между гидрофонами буксировалась за судном. Сигнал регистрировался станцией SplitMultiSeis Station 32/24b. GPS-система Trimble R9s использовалась для получения необходимых навигационных данных.

Результаты исследований и их обсуждение.
Сейсмостратиграфический анализ. Полученные данные ССВР были обработаны по графу общей срединной точки в ПО RadExPro. Выгруженные суммированные временные разрезы были использованы для последующей интерпретации. В ПО The Kingdom по волновой картине, амплитудному и частотному составу записи было выделено 5 сейсмокомплексов СК1-СК5 (рис. 3), заключенных между динамически выраженными отражающими горизонтами ОГ0-ОГ4 [Шалаева и др., 2010].

В 2020 г. в Петрозаводской губе было выполнено бурение инженерно-геологической скважины (рис. 4). С опорой на результаты бурения (до 10 м, что соответствует СК1-СК3) и с привлечением дополнительной литературы о геологии района был выполнен сейсмостратиграфический анализ. Результатом анализа стали структурные карты и карты изопахит, построенные по каждому ОГ, а также описание всех выделенных СК.

Сопоставление выделенных сейсмических комплексов с геологическим описанием.

I. СК1: средний и верхний голоцен (IИ2-3). СК1 заключен между ОГ0, поверхностью дна озера и ОГ1 (рис. 5). Комплекс характеризуется акустически прозрачной волновой картиной и представлен толщей с относительно небольшой мощностью (от 0 до 3 м). В основном распространен в юго-западной и центральной частях полигона. Глубина залегания кровли комплекса варьируется в пределах от 9 до 29 м.

Геологическое описание: озерные илы и глины, обогащенные органическим веществом, текучие, серого и зеленовато-серого цветов. Вниз по разрезу более отчетливо прослеживается слоистость осадков, уменьшается их влажность, меняется консистенция: с текучей на текуче-пластичную. Встречаются оксиды марганца.

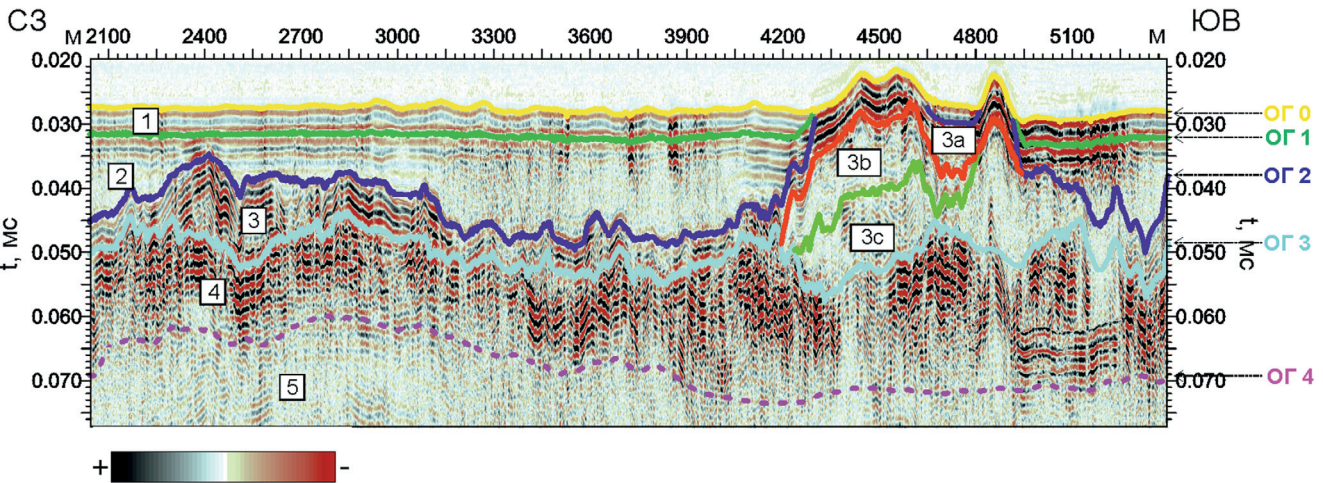


Рис. 3. Временной разрез с выделенными ОГ и СК

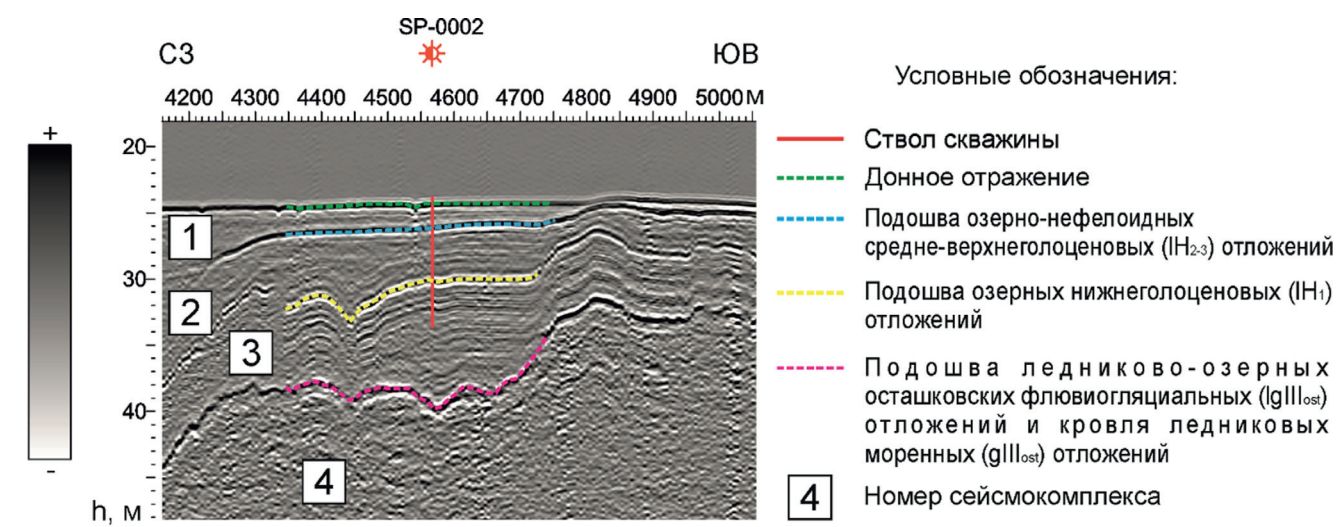


Рис. 4. Сейсмический разрез в области бурения инженерно-геологической скважины

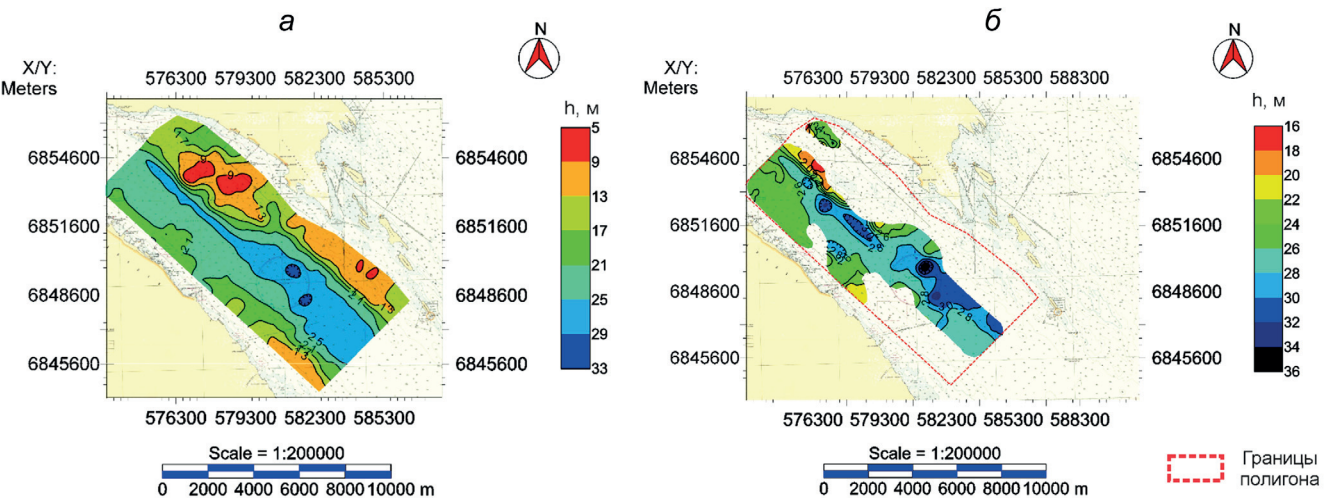


Рис. 5. Структурная карта по поверхности ОГ0: а — шаг изолиний 4 м; б — ОГ1 (подошва СК1), шаг изолиний 2 м

II. СК2: нижний голоцен (IH). СК2 ограничен в подошве ОГ2 (рис. 6, а), который является динамически выраженным рефлексом и имеет выдержанное простирание по положительной фазе. СК2 характеризуется полупрозрачной волновой картиной со слабо проявленной волнистой слоистостью. Местами в СК1 и СК2 наблюдается хаотическая волновая картина и потеря корреляции осей синфазности. Выделяются высокоамплитудные аномалии с обратной полярностью типа «яркое пятно», вызванные возрастанием коэффициента отражения. Глубина залегания кровли комплекса варьируется от 12 до 32 м. Мощность комплекса изменяется от первых метров до 28 м в северо-западной части площадки (рис. 6, б).

Геологическое описание: ледниково-озерные микрослоистые глины серого и буровато-серого цветов, более уплотненные по сравнению с осадками вышележащего комплекса. Встречаются признаки газопроявления.

III. СК3: поздний неоплейстоцен, ошашковский (lgIIIost) горизонт, Валдайское оледенение. СК3

ограничен в подошве ОГ3 (рис. 7), который также является динамически выраженным рефлексом и имеет практически выдержанное простирание по положительной фазе. СК3 характеризуется ярко выраженной волновой картиной с четкими параллельными осями синфазности средней и низкой амплитуды.

В СК3 наблюдается изменчивость интенсивности отражений по латерали. Например, на рис. 3 видно, что в ЮВ части профиля существенно изменяется амплитуда отраженных волн и конфигурация осей синфазности, поэтому СК3 можно разделить на три подкомплекса: СК3а, СК3б, СК3с. СК3а соответствует параллельно слоистый тип записи с хорошо прослеживаемыми осями синфазности средней амплитуды. СК3б имеет волновую картину со слабо проявленной волнистой слоистостью и низкой амплитудой. СК3с обладает схожей волновой картиной с СК3б, но с хорошо прослеживаемыми осями синфазности и средней амплитудой записи. Подобная латеральная изменчивость для СК3 встречается только в юго-западной части полигона

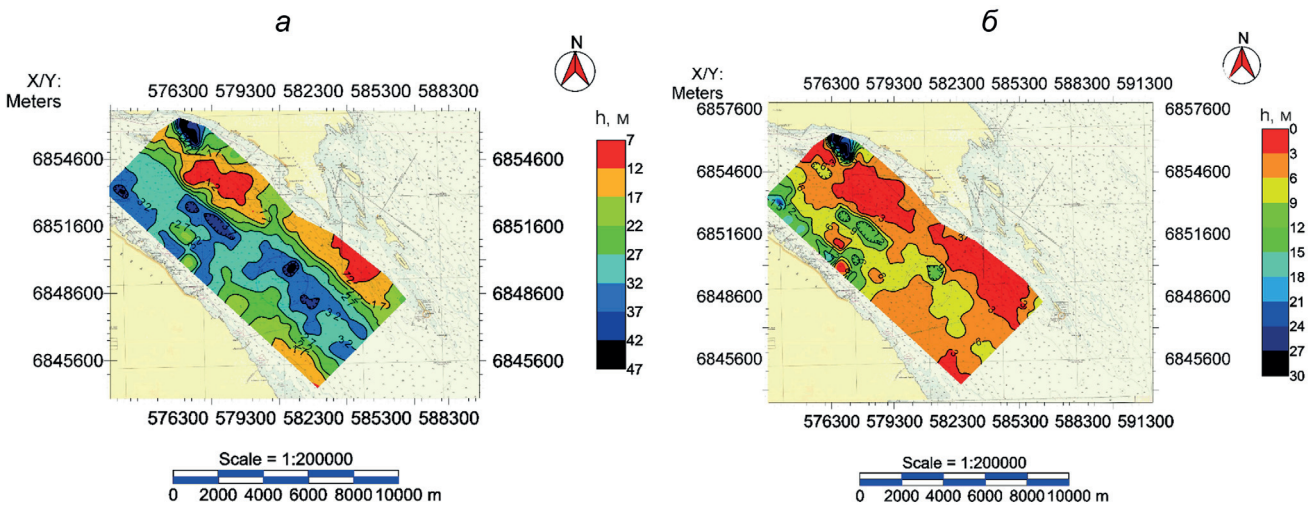


Рис. 6. а — структурная карта по поверхности ОГ2 (подшва СК2), шаг изолиний 5 м; б — Карта изопакит отложений СК1-2, шаг изолиний 3 м

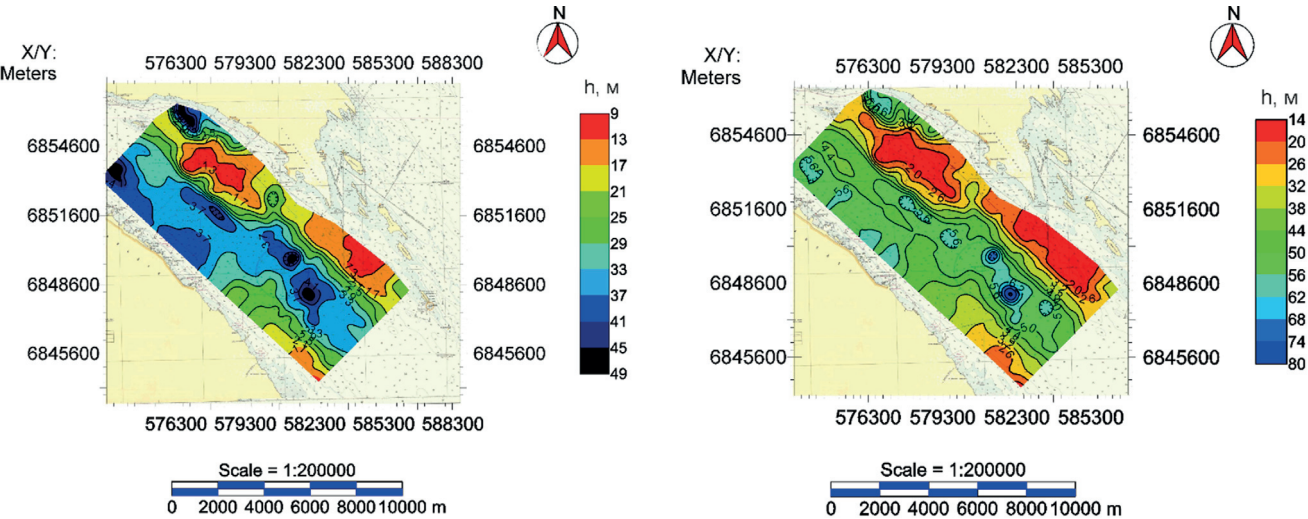


Рис. 7. Структурная карта по поверхности ОГ3 (подшва СК3). Шаг изолиний 4 м

Рис. 8. Структурная карта по поверхности ОГ4 (подшва СК4 и кровля СК5). Шаг изолиний 6 м

и протяженность области составляет не более 1 км в юго-восточном направлении. Глубина залегания кровли комплекса варьируется от 13 до 45 м. Мощность комплекса изменяется от первых метров до 20 м в юго-западной части площадки.

Геологическое описание: ледниково-озерные глины, которые переслаиваются с песчаными алевритами, песками, супесями с различным содержанием мелкой дресвы (2–10 мм) кристаллических пород.

IV. СК4: поздний неоплейстоцен, ошайковский (*IgIIIost*) горизонт, Валдайское оледенение. СК4 ограничен в подошве ОГ4 (рис. 8), который не является хорошо выраженным динамически рефлексом. СК3 и СК4 имеют схожий тип волновой картины — параллельно слоистый с хорошо прослеживаемыми осями синфазности. Волновая картина характеризуется наличием высокоамплитудных параллельно слоистых осей синфазности. Глубина залегания кровли комплекса варьируется от 15 до 74 м. Мощность комплекса изменяется от первых метров до 22 м в центральной части площадки. Карта изопакит для СК1-СК4 представлена на рис. 9.

Геологическое описание: моренные отложения, представленные неправильным чередованием глин, суглинков, песков и супесей с различным содержанием крупного валунного материала (>10 мм).

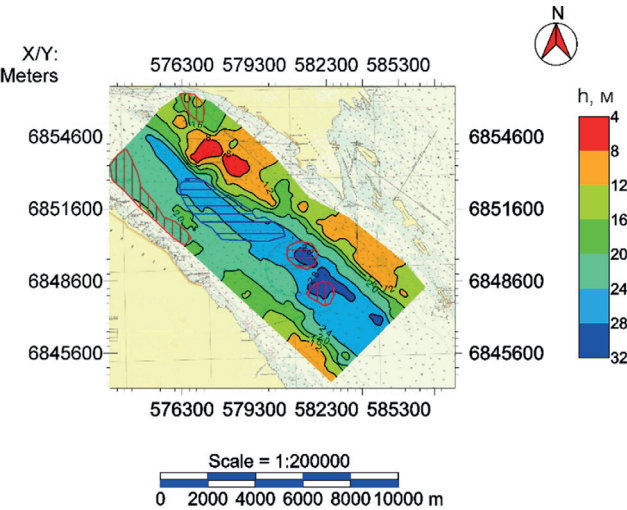


Рис. 9. Карта изопакит отложений СК1-4. Шаг изолиний 4 м

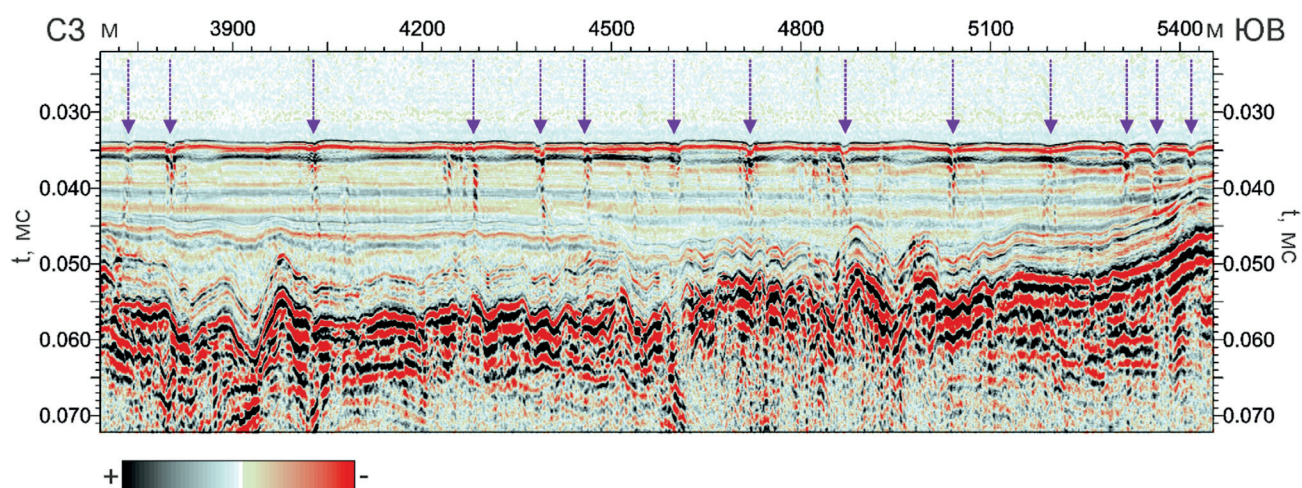


Рис. 10. Сейсмический профиль. Стрелками обозначены покмарки

V. СК5: нижний протерозой (PR1). СК5 ограничен в кровле ОГ4 (рис. 8). СК5 является акустическим фундаментом, кровля которого (ОГ4) имеет неровный характер и является самой нижней из всех отражающих горизонтов. Комплекс характеризуется хаотической волновой картиной и отличается от вышележащей толщи значительным уменьшением амплитуды отраженной волны. Глубина залегания подошвы комплекса варьируется от 15 до 74 м.

Геологическое описание: кристаллический фундамент, состоящий из интенсивно метаморфизованных шокшинских кварцитов.

Области с повышенным содержанием газа в верхней части разреза. Как было отмечено выше, в СК1-СК2 встречаются аномалии типа «яркое пятно», данные области выделены красным штрихом на рис. 9 и связаны с наличием свободного газа в верхней части разреза. Можно заметить, что данные участки приурочены к понижениям в рельефе и местам увеличения мощности грунта.

Также были обнаружены области разгрузки газа или кратерообразные понижения в рельефе дна (рис. 10), которые в литературе называются покмарками [Алёшин и др., 2018]. Область распространения покмарок обозначена синим штрихом на рис. 9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алёшин М.И., Видищева О.Н., Валиева Э.И. и др. Четвертичные отложения открытой части Онежского озера и Заонежского залива // Геофизические исследования. 2021. Т. 22, № 3. С. 35–52.
2. Алёшин М.И., Миронюк С.Г., Рыбалко А.Е. и др. Первые итоги изучения покмарок Онежского озера // Процессы в геосредах. 2018. Т. 1. № 14. С. 732–740.
3. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А. и др. Четвертичные отложения и рельеф Онежского озера // Географический вестник. 2021. № 1(56). С. 6–16.
4. Литвиненко А.В., Регеранд Т.И. Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие. Петрозаводск: Изд-во Карельский научный центр РАН, 2013. 109 с.
5. Миринец А.К., Бобачев А.А., Рыбалко А.Е. Исследования донных отложений Онежского озера методами

Выводы. Настоящая статья представляет результаты интерпретации данных ССВР, полученных в Петрозаводской губе Онежского озера. В соответствии с обозначенной во введении целью была выполнена камеральная обработка и интерпретация сейсмических данных. На временных разрезах было выделено 5 ОГ и 5 СК, различающихся по типу волновой картины. Построены структурные карты основных ОГ и карты изопакит соответствующим им СК, которые покрывают всю Петрозаводскую губу. Далее выделенные СК были сопоставлены с геологическим описанием по результатам бурения и с привлечением литературных источников.

Благодарности. Авторы выражают благодарность научной компании ООО «Сплит» и Токареву Михаилу Юрьевичу за организацию и проведение полевых работ на Онежском озере и за предоставленные данные и Карельскому научному центру РАН за предоставление судна «Эколог».

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-05-00303) и Российского научного фонда (грант № 18-17-00176).

сейсморазведки и электроразведки // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101, № 2. С. 5–21.

6. Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А. и др. Карта четвертичных отложений Онежского озера: результаты комплексных геолого-геофизических работ в 2016–2019 гг. // Труды IX Междунар. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)». Т. III: [сборник]. Тверь: ПолиПРЕСС, 2020. 517 с.

7. СП 504.1325800.2021. Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования. М.: Минстрой России, 2021. 168 с.

8. Субетто Д.А., Потахин М.С., Зобков М.Б. и др. Развитие Онежского озера в позднеледниковые по результатам ГИС-моделирования // Геоморфология. 2019. № 3. С. 83–90.

9. Субетто Д.А., Белкина Н.А., Страховенко В.Д. и др. Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям [коллективная монография]. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022, 333.

10. Токарев М.Ю. Разработка технологии многоканальных сейсмоакустических исследований с заглубленными системами на мелководных акваториях: Дисс. ... канд. тех. наук. М., 2016.

11. Филатов Н.Н. Онежское озеро. Атлас. Петрозаводск: Изд-во Карельский научный центр РАН, 2010, 151 с.

12. Шалаева Н.В., Старовойтов А.В. Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях. М.: Изд-во МГУ, 2010. 254 с.

13. Aleshin M.I., Gaynanov V.G., Tokarev M.J., et al. The study of sub-bottom sediments in Petrozavodsk Bay of Lake Onega using complex geological-geophysical methods of data analysis // Moscow University Geol. Bull. 2019. Vol. 74, No. 5. P. 98–104.

14. Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V., et al. Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia) // Minerals. 2020. No. 10. P. 964.

15. Valieva E.I., Poludetkina E.N., Vidishcheva O.N., et al. Geochemical characteristics of bottom sediments of Lake Onega // E3S Web of Conferences. EDP Sciences (France). 2021. No. 206.

Статья поступила в редакцию 15.03.2023,
одобрена после рецензирования 05.06.2023,
принята к публикации 05.03.2024