

УДК 550.8.05

ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОТКРЫТОЙ ЧАСТИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ЗАОНЕЖСКОГО ЗАЛИВА

© 2021 г. М.И. Алёшин^{1,2}, О.Н. Видищева³, Э.И. Валиева³, А.К. Миринец¹,
Е.Д. Егошина³, А.Е. Рыбалко⁴, М.Ю. Токарев³, Е.Н. Полудеткина³

¹ ООО “Сплит”, г. Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴ Институт наук о Земле, г. Санкт-Петербург, Россия

Автор для переписки: М.И. Алёшин (e-mail: maan@ifz.ru)

Подробно описаны результаты полевых геолого-геофизических и геохимических изысканий, проводившихся в 2018–2019 гг. на акватории открытой части Онежского озера и Заонежского залива. В целях изучения верхней части геологического разреза, структуры и свойств придонных осадков в пределах названных акваторий были выполнены исследования методом сейсморазведки сверхвысокого разрешения (ССВР), проведен геологический пробпоотбор гравитационной трубкой, а также геохимический анализ состава газа и органического вещества в кернах. По результатам интерпретации полученных материалов удалось выделить пять различных сейсмокомплексов, включая акустический фундамент, соответствующий коренным кристаллическим породам, моренные отложения и озерные осадки. Для выделенных горизонтов были рассчитаны значения таких характеристик физических свойств пород, как скорость продольных волн, коэффициент отражения и акустический импеданс. Характеристики, полученные для отложений Заонежского залива, схожи с характеристиками, полученными для Петрозаводской губы Онежского озера. Данные геоэкологического пробпоотбора позволили более полно провести литологическое расчленение образцов. Геохимические исследования показали, что главным компонентом газовой смеси в осадках является биогенный метан.

Ключевые слова: Онежское озеро, сейсмоакустическое профилирование, сейсмостратиграфия, четвертичные отложения, озерные осадки, газы в донных отложениях, покмарки, компьютерная томография донных осадков.

Введение

В последнее время активизировались работы по исследованию разрезов четвертичных отложений Онежского озера, все сведения о которых до недавнего прошлого опирались на данные изучения коротких трубок (до 1 м), практически бесполезных при анализе плотных грунтов [Палеолимнология..., 1976; Семенович, 1973]. Исключением были морские геологосъемочные работы в южной части Онежского озера и локальные исследования финских и карельских геологов в северной части озера, включавшие сейсмоакустическое профилирование и тяжелый колонковый пробпоотбор, для определения времени возникновения первого приледникового озера в котловине Онежского озера [Saarnisto, Saarinen, 2001; Демидов, 2004]. Новый этап изучения четвертичного покрова в котловине Онежского озера начался в 2016 г., когда несколько организаций – Центр анализа сейсмических данных и Центр морских исследований, представляющие Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Институт наук о Земле (Санкт-Петербургский государственный университет) и Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН организовали полигонные работы в Петрозаводской губе Онежского озера. Основанием для постановки таких работ послужило

выявление следов газонасыщенности в осадках при опытно-методических работах с геофизической аппаратурой в Петрозаводской губе в 2015 г. Целью комплексных геолого-геофизических исследований, организованных в 2016 г., стало изучение строения осадочного чехла Онежского озера и отработка методики проведения работ, входящих в комплекс инженерно-геологических изысканий. По геофизическим и литологическим данным было произведено литостратиграфическое расчленение верхней части разреза. Наличие повышенных концентраций газа в осадках было установлено по результатам газогеохимической съемки на кернах, отобранных вблизи зон сфокусированной разгрузки газа [Алёшин и др., 2018]. Гидролокационная съемка дна залива позволила обнаружить покмарки – воронкообразные структуры, образующиеся в результате разгрузки газов из донных осадков. Впервые для внутренних бассейнов северо-запада России были выполнены томографические исследования кернов, позволяющие детально охарактеризовать текстурные особенности позднечетвертичных осадков, в том числе документально зафиксировать особенности проявления газов в толще глинистых осадков (рис. 1). Результаты этих работ в настоящее время частично опубликованы (см., например, [Рыбалко и др., 2019; Rybalko et al., 2020; Subetto et al., 2020]).

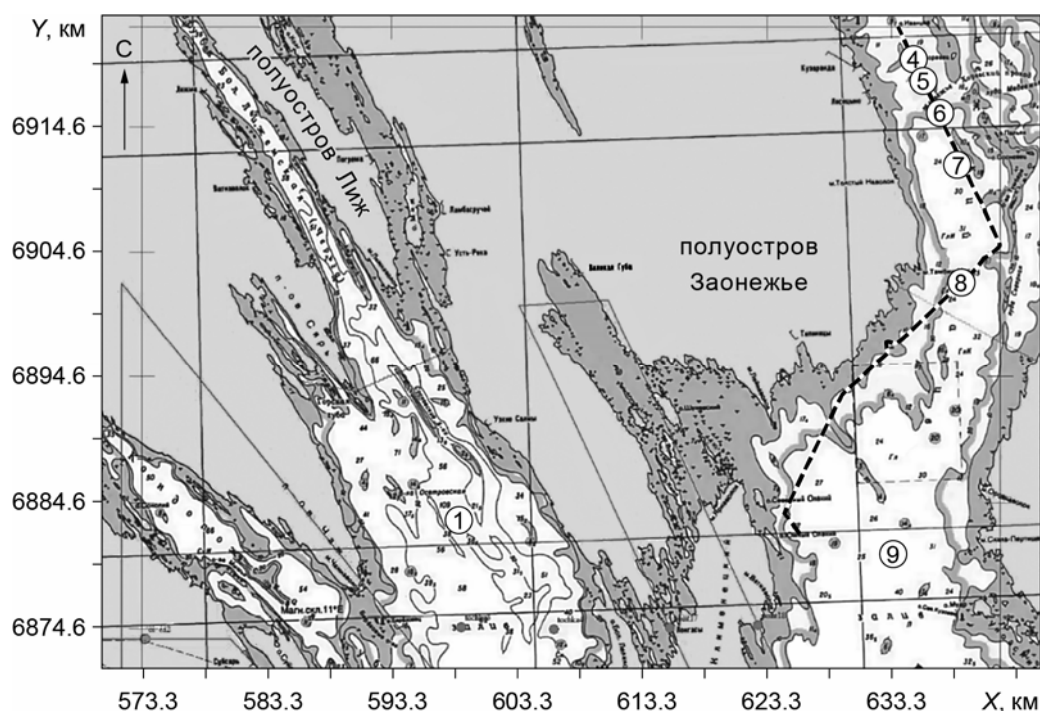


Рис. 1. Онежское озеро. Карта фактического материала 2019 г. Штриховая линия – сейсмоакустический профиль; кружки с цифрами – станции донного пробоотбора с номерами. Координаты представлены в проекции *UTM-36N (WGS-84)*

Fig. 1. Lake Onega. Factual map of 2019. The dashed line indicates the seismoacoustic profile, circles with numbers – bottom sampling stations with numbers. Coordinates are presented in the projection *UTM-36N (WGS-84)*

В 2016–2017 гг. были выполнены геолого-геофизические исследования в открытой части Онежского озера к югу от Петрозаводской губы. В 2018–2019 гг. эти работы были продолжены и охватили центральную и южную часть озера, а также его крупнейшие заливы – Заонежский и Повенецкий. Результаты последних работ и обсуждаются в статье.

Общая характеристика района исследований

Онежское озеро является вторым по величине водоемом в Европе, средняя глубина его равна 30 м, максимальная – 120 м. Площадь зеркала озера составляет 9720 км².

К настоящему времени выявлены особенности формирования котловины озера, изучены современное состояние гидрологических и гидрофизических процессов и явлений, биоты, гидрохимические характеристики водной толщи, состав и свойства грунтов [Онежское ..., 2010].

Котловина озера, имеющая тектоническое происхождение, расположена в зоне сочленения древнего Балтийского щита и Русской плиты. Сформировавшаяся в результате позднепротерозойских тектонических движений грабенообразная структура в четвертичное время неоднократно моделировалась ледниковыми потоками [Демидов, 2004]. Движение ледников в пределах котловины контролировалось древними тектоническими структурами и происходило преимущественно с северо-запада на юго-восток. В неоплейстоцене через Онежскую впадину в этом направлении происходило перемещение Онежско-Белозерской лопасти Скандинавского ледникового щита. При этом вследствие экзарации практически были уничтожены более древние ледниковые и межледниковые отложения. В результате, в поздневалдайское время практически весь бассейн Онежского озера был перекрыт льдами этой лопасти (Карельским ледником). Деграляция ледникового покрова в Онежской впадине началась около 13–14 тыс. лет назад и завершилась около 11.6 тыс. лет назад [Демидов, 2005; Филимонова, Лаврова, 2017; Saarnisto, Saarinen, 2001]. Позднее, всего через 1.5 тыс. лет после освобождения северных побережий озера от материкового льда, активизировались гляциоизостатические движения земной коры. Этот процесс сопровождался сильными землетрясениями с максимальными магнитудами 5.8–6.8 [Никонов, Шварев, 2015].

В настоящее время построены модели освобождения впадины Онежского озера от ледникового покрова [Субетто и др., 2019]. Однако большая часть заливов (кроме губы Кондопога и частично залива Большое Онего) в геологическом отношении изучены недостаточно.

Результаты сейсмоакустических работ

В 2019 г. впервые была проведена съемка методом сейсмоакустики сверхвысокого разрешения (ССВР) в Заонежском заливе (кроме северной его части, которая носит самостоятельное название – Повенецкий залив) (рис. 2).

Геофизическая съемка проводилась с научно-исследовательского судна “Эколог” при скорости движения судна 3–6.5 узлов. Скорость определялась навигационными и погодными условиями. Аппаратурный комплекс представлял собой приповерхностную буксируемую приемно-излучающую систему. В качестве излучателя использовался 100-электродный “спаркер” в контейнере с соленым раствором. Сигнал регистрировался 24-канальной аналоговой сейсмоакустической косой с шагом между каналами 2 м. Перед началом съемки выполнялись опытно-методические работы по определению оптимальных параметров съемки и проверке работоспособности оборудования. Оптимальная глубина буксировки составляла 0.75 м; энергия источника была выбрана равной 1 кДж; интервал между выстрелами – 1 с. Общая длина профилей составила 20 км.

Обработка сейсмоакустических данных производилась по стандартному графу общей срединной точки (ОСТ). По ее окончании была выполнена сейсмостратиграфическая интерпретация, в результате которой были выделены основные сейсмоакустические комплексы (СК), разделенные четкими отражающими горизонтами (рис. 3).

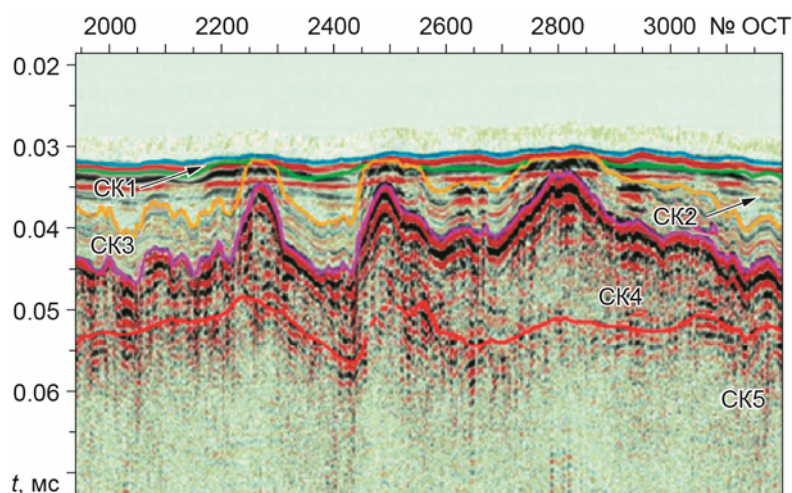


Рис. 2. Пример данных, полученных методом ССВР на акватории заонежского залива. Цветными линиями обозначены отражающие горизонты, соответствующие кровле выделенных сейсмоакустических комплексов: СК1 – нефеловидные осадки; СК2, СК3 – ледниково-озерные отложения со слабо выраженной слоистостью (СК2) и с выдержанной слоистостью (СК3); СК4 – моренные отложения; СК5 – акустический фундамент

Fig. 2. An example of data obtained by the very high resolution seismic survey method in the water area of the Zaonezhsky bay. Colored lines indicate reflecting horizons corresponding to the top of the identified seismoacoustic complexes: CK1 – nepheloid sediments; CK2, CK3 – glacial-lacustrine sediments (CK2) with weakly expressed stratification and (CK3) with sustained stratification; CK4 – moraine deposits; CK5 – acoustic basement

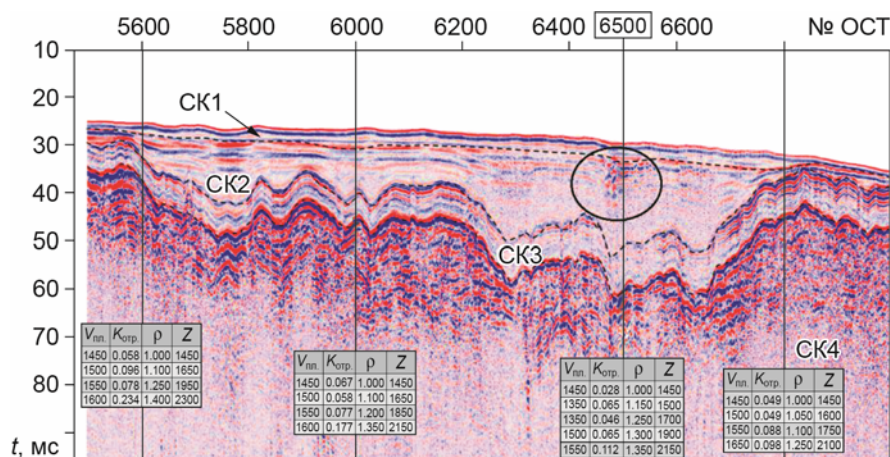


Рис. 3. Сейсмоакустический разрез с нанесенными значениями пластовых скоростей ($V_{пл.}$), коэффициентов отражения ($K_{отр.}$), плотности (ρ) и акустического импеданса (Z). Вертикальные линии указывают на ОСТ, в которых производился расчет свойств. Окружность – граница области с наиболее выраженными признаками газонасыщенности в осадках, наблюдаемой на ОСТ № 6500 (выделена рамкой). Кровля акустического фундамента СК5 на данном разрезе не прослеживается

Fig. 3. Seismoacoustic section with plotted values of formation velocities ($V_{пл.}$), reflection coefficients ($K_{отр.}$), density (ρ) and acoustic impedance (Z). Vertical lines indicate the common midpoints in which the properties were calculated. The circle is the border of the area with the most pronounced indicators of gas saturation in sediments, observed at common midpoint No. 6500 (highlighted by a frame). The top of the acoustic basement CK5 on this section is not traced

Интерпретация сейсмостратиграфического разреза опирается на полученные ранее данные по литостратиграфии Онежского и Ладожского озер [Рыбалко и др., 2019; Subetto et al., 2020; Беляев, Рыбалко, Субетто, 2020; Беляев и др., 2021; Rybalko et al., 2020; Beliaev et al., 2020; Lebas et al., 2021; Strakhovenko et al., 2018, 2020; Hang et al., 2019; Zobkov et al., 2019; Gromig et al., 2019], а также на материалы опорного бурения в Петрозаводской губе Онежского озера [Subetto et al., 2020]. Принимая во внимание вышеизложенные представления об основных отражающих границах на разрезах, сейсмостратиграфическую схему для описываемого района Онежского озера можно представить следующим образом.

1. Наиболее глубокая отражающая граница *AF*, обозначенная на рис. 2 красной линией, соответствует кровле акустического фундамента, который выделен в ранге специального сейсмокомплекса СК5. Эта граница имеет неровный характер и прослеживается лишь на некоторых участках съемки. Ниже нее не отмечается никаких отражающих горизонтов. Перепады уровня поверхности могут достигать десяти и более метров. Подтверждением интерпретации может служить тот факт, что во всех внутренних бассейнах северо-запада России аналогичная граница ассоциируется с кровлей коренного цоколя и наиболее ярко проявлена в зоне развития кристаллических пород [Максимов и др., 2015; Рыбалко и др., 2017].

2. Акустический фундамент перекрыт толщей отложений с характерной высокоамплитудной хаотической записью (СК4). Учитывая форму залегания геологических тел, положительный рельеф кровли и структуру самой толщи, эти отложения относят к ледниковым образованиям, а именно к основной или донной морене, формирующейся при отступании ледника. Ледниковая природа этого комплекса подтверждена геологическими данными на Ладожском озере и в Кандалакшском заливе Белого моря [Рыбалко и др., 2017; Lebas et al., 2021]. Яркость импульса, отраженного от кровли СК4, связана с высокой плотностью моренных отложений (до 2.1 г/см^3).

3. Сейсмокомплекс СК3 развит практически повсеместно. Он перекрывает толщу моренных отложений и характеризуется относительно высокой отражающей способностью, хорошо выраженной слоистостью и может быть отнесен к ледниково-озерным осадкам. Слоистость хорошо выдержана, близка к периодической. Мощность осадков для разных ритмов колеблется от 0.8 до 2 см. Стоит отметить, что мощность данного сейсмокомплекса (5–10 м) практически совпадает с мощностью аналогичного сейсмокомплекса, выделяемого на акватории Петрозаводской губы [Subetto et al., 2020]. Вероятно, седиментационные процессы в разных частях приледникового озера в Онежской впадине были схожими.

4. Сейсмокомплекс СК2 представлен полупрозрачной толщей со слабо проявленной волнистой слоистостью. В Петрозаводской губе в границах этого сейсмокомплекса трубками были вскрыты однородные серые глины, иногда со слабо видимой слоистостью. Данные палинологического анализа показали, что накопление глин происходило в течение позднего дриаса [Subetto et al., 2020]. Граница между СК3 и СК2 может быть идентифицирована как раздел между двумя разными пачками ледниково-озерных отложений. При этом верхняя пачка накапливалась в то время, когда ледник практически покинул Онежскую котловину, и талые воды попадали в нее по уже начинающей формироваться речной системе. Отдельно стоит отметить, что в местах, где данная толща имеет наибольшую мощность, в осадках выделяются такие признаки газонасыщенности, как изменение волновой картины, инверсия фазы и скоростной эффект.

5. В верхней части сейсмограммы выделяется толща осадков, характеризующаяся акустически прозрачной волновой картиной, с иногда намечающейся слоистостью. Опробование в Петрозаводской губе показало, что данная толща представлена тонко-

зернистыми разностями (пелитами и алевропелитами) текучей и текуче-пластичной консистенции со стяжениями, иногда полосчатой формы, сложенными гидроокислами марганца черного цвета и родохрозитом [Subetto et al., 2020]. Это типичные озерные нефелоидные осадки (илы) голоценового возраста.

Помимо сейсмостратиграфического анализа волновой картины, были проведены процедуры, позволившие оценить физические свойства осадков, слагающих верхнюю часть разреза.

Основываясь на данных по плотностям, полученным в ходе пробоотбора, и априорной информации, был проведен расчет акустической инверсии в нескольких точках вдоль сейсмоакустического профиля в Заонежском заливе. Акустическая инверсия – процедура решения обратной задачи сейсморазведки, т.е. восстановление упругих параметров геологической среды по зарегистрированному волновому полю [Амтилов и др., 2009]. Скорость распространения продольных сейсмических волн плавно растет с глубиной и находится в диапазоне от 1450 до 1600 м/с. Плавно возрастают и другие атрибуты – коэффициент отражения и импеданс. Однако в местах распространения газонасыщенных осадков наблюдаются скоростные аномалии – скорость продольных волн на таких участках уменьшается, по крайней мере, на 100 м/с относительно обычных значений. При этом коэффициент отражения увеличивается в несколько раз, что также характерно для газонасыщенных горизонтов. Значения скоростей, полученных в ходе акустической инверсии, схожи с теми, что наблюдаются по сейсмоакустическим данным, полученным в Петрозаводской губе.

Верхнечетвертичные отложения и их газонасыщенность

Как уже отмечалось, одной из причин начала работ на Онежском озере стало выявление по геофизическим данным в 2015 г. ранее неизвестных газопроявлений в четвертичных отложениях Петрозаводской губы [Алешин и др., 2018]. Такая находка была одной из первых как для Онежского, так и для Ладожского озер, что представляло значительный научный интерес. В 2016 г. новые исследования проводились сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института океангеологии [Subetto et al., 2020], а с 2018 г. – специалистами из Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. В экспедициях 2018 и 2019 гг. были выполнены работы на 18 станциях донного пробоотбора в открытой части залива и в губах Большое Онего и Заонежский залив (рис. 4); в процессе работ было отобрано и описано 34 керна общей длиной 65 м.

Геологический пробоотбор выполнялся с помощью ударной грунтовой трубки диаметром 127 мм, длиной 3 м и общим весом 300 кг. Керна отбирались в пластиковые трубы, которые извлекались из трубки для дальнейшей обработки. Положения станций пробоотбора выбирались по данным предварительной интерпретации сейсмоакустического профилирования. Станции намечались как в зонах наиболее интенсивной голоценовой нефелоидной седиментации, где обычно и фиксировались выделения газов, так и на участках подхода к поверхности подстилающих отложений. Отдельно были выбраны точки с видимыми признаками проявления газов в кернах отобранных колонок.

На каждой станции производилось по два сброса трубы. Первый керн открывался на борту и использовался для описания донных осадков. Затем из разных участков керна отбирались образцы для дальнейших геологических и газо-геохимических исследований. После второго спуска в тех же координатах керн оставался в пластиковых вкладышах, разрезался на секции по 1 м, упаковывался герметично и в таком виде транспортировался в лаборатории.

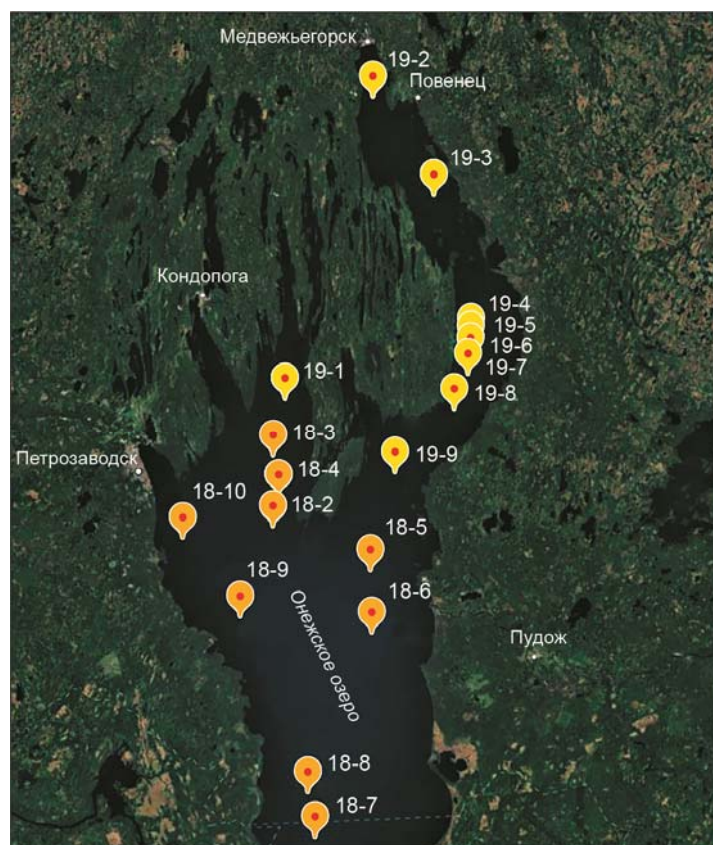


Рис. 4. Онежское озеро. Схема расположения станций донного пробоотбора 2018–2019 гг. Здесь и на рис. 6 цифрами обозначены год и идентификационные номера станций

Fig. 4. Lake Onega. Layout of bottom sampling stations 2018–2019. Here and in Fig. 6, numbers indicate the year and identification numbers of the stations

Использование сейсмоакустических данных для предварительного выбора станций пробоотбора позволило вскрыть прямыми геологическими методами большую часть разреза четвертичных отложений, расположенных выше кровли ледниковых и флювиогляциальных образований, описанных в первой части нашей статьи. В разрезе представлено несколько основных горизонтов, описание которых приводится ниже.

1. В основании разреза рыхлых осадков Онежского озера залегают моренные образования осташковского оледенения, перекрытые или фациально замещающиеся флювиогляциальными отложениями этого же возраста (*gПлос*, *Плос*). Моренные образования сложены очень плотными суглинками и супесями с валунами и щебнем кристаллических пород. Во флювиогляциальных осадках встречаются пески с галькой. Подобные отложения на поверхности дна отмечаются как по берегам заливов, так и на выходе из Петрозаводской губы.

2. Отложения ледникового комплекса осташковского возраста перекрываются толщей лимногляциальных осадков, в которой можно выделить три пачки, различающиеся как текстурными, так и физическими свойствами.

2.1. Кровля ледниковых отложений с размывом перекрывается пачкой переслаивания серых, часто песчанистых глин с алевроитами и даже алевроитовыми песками. Слоистость неправильная, хотя четко просматривается цветовая цикличность. Осадки очень плотные и были вскрыты только в буровой скважине. Компьютерная томограмма этой части керна показала сложное строение пачки слоистых осадков. В некоторых

кернах отмечается до трех различных групп циклов. Во всех случаях радиографии кернов показали наличие характерной градационной слоистости, которая присуща гляциотурбидитам. По своему генезису эти осадки, вероятно, являются проксимальными фациями, сформировавшимися в период, когда край отступающего ледника еще был в озере или на самом берегу.

2.2. Пачка типичных ленточных глин с градационной текстурой. В наиболее полных разрезах можно проследить постепенную смену бежевых тонов бежевато-серыми снизу вверх по разрезу. Мощность слоев постепенно уменьшается вверх по разрезу. На рентгенограммах наиболее полных кернов отчетливо заметно постепенное увеличение расстояния между кровлей и подошвой отдельных более грубых слоев. Это отвечает одновременно наблюдаемому визуальному увеличению глинистости осадков. В верхней части ленточнослоистых осадков керна буровой скважины, как и в отобранных грунтовых колонках, отмечается прослой так называемых “розовых” глин, генетическая природа которого пока не выяснена и связывается как с изменением гидрохимии палеобассейна, так и с интенсивным, но кратковременным внешним воздействием [Hang et al., 2019; Gromig et al., 2019].

2.3. Верхняя пачка ледниково-озерных отложений отнесена к таковым по данным спорово-пыльцевого анализа [Rybalko et al., 2020]. Она представлена гомогенными алевропелитами и пелитами пепельно-серого цвета, иногда с оливковым оттенком. Наблюдаются включения псаммитовой размерности, предположительно представленные аутигенными включениями сульфидов. Прослеживаются темно-серые до черных скопления гидроокислов марганца [Subetto et al., 2020]. В некоторых колонках отмечается эрозионный контакт с нижележащей толщей ленточнослоистых осадков, подчеркнутый скоплением песчаного материала. Выше по разрезу залегают серые алевропелиты с нечеткой диагенетической полосчатостью, обусловленной тонкими полосами гидроокислов марганца [Страховенко и др., 2018].

3. Венчает разрез пачка зеленовато-бурых алевропелитов, почти всегда содержащая примесь тонкого псаммита, хаотично разбросанного по разрезу. В осадках отмечены черные пятнисто-полосчатые скопления гидроокислов марганца и зеленоватые полосы, сложенные вивианитом [Страховенко и др., 2018]. Осадки обладают текуче-пластичной консистенцией, которая вверх по разрезу переходит в текучую. В верхней части обычно фиксируется зона окисления, представленная бурым жидким глинистым наилком в губах.

Как было отмечено ранее, по геофизическим данным в верхней части разреза можно судить о наличии газа в осадках Заонежского залива. Для проверки этой информации несколько станций донного пробоотбора были размещены в местах, где предполагались скопления газа. В южной части залива в донных осадках были установлены макропризнаки газонасыщенности – “вскипание” керна с образованием пузырей. Данные компьютерной томографии (рис. 5) также подтверждают результаты полевых наблюдений.

На компьютерной томограмме отчетливо прослеживается высокая пористость илов в верхней секции керна. Поры располагаются вдоль наклоненных вверх поверхностей напластования, что указывает на наличие вертикальных восходящих движений растворенного газа.

Для определения состава и свойств газов в донных осадках были проведены специальные газогеохимические исследования, которые также включали анализ органического вещества в кернах. Из каждой трубки при этом отбирались пробы из каждого литостратиграфического горизонта – всего 56 проб из 18 станций донного пробоотбора (см. рис. 4).

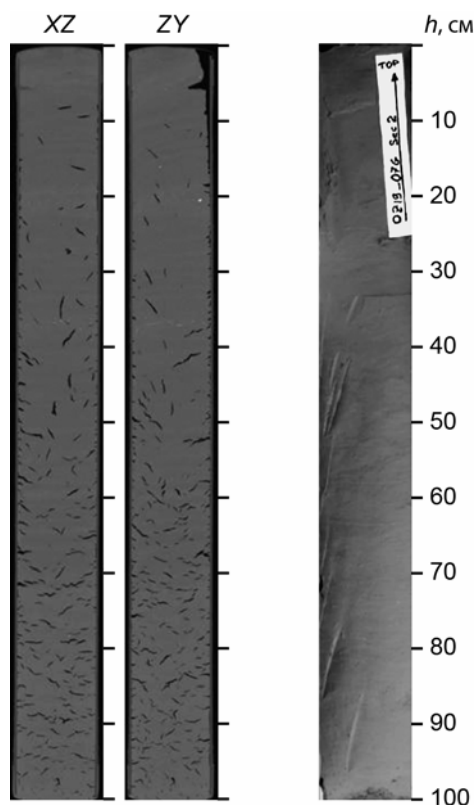


Рис. 5. Компьютерная томограмма в проекциях XZ , ZY (слева) и фото (справа) верхней секции трубки, извлеченной на станции донного пробоотбора 19-7. Керна представлен голоценовыми глинисто-алевролитовыми илами. h – высота трубки, см

Fig. 5. Computer tomogram in the projections XZ , ZY (on the left) and photo (on the right) of the upper section of the tube extracted at the bottom sampling station 19-7. The core is represented by Holocene clayey-siltstone silts. h – tube height, cm

Извлечение газовой фазы и люминесцентно-битуминологический анализ проводились из одних и тех же интервалов керна. Дегазация выполнялась по методу “*Head space*” [Большаков, Егоров, 1987]. Изучение газовой фазы происходило на портативном газовом хроматографе “Хроматэк-газохром 2000” с двумя детекторами по теплопроводности для определения углеводородных (газообразных углеводородов C_1 – C_5) и неуглеводородных (O_2 , N_2 , CO_2) газов.

Изотопный состав углерода ($\delta^{13}C$) компонентов проб газа измерялся на изотопном масс-спектрометре “*Thermo Fisher Scientific Delta V Plus*” с хромато-масс-спектрометрической приставкой “*ISQ-TRACE 1310*”.

В результате проведенных исследований было установлено, что главным компонентом газовой смеси является метан, самые высокие концентрации которого были зафиксированы на станциях донного пробоотбора 18-3 и 18-4 в заливе Большое Онего (рис. 6, *вверху*). Максимальная концентрация метана составила 145339 ppm на станции 18-3 и 95481 ppm на станции 18-4. Средние значения концентрации газа составляют 6212 ppm.

В целом, содержание газа увеличивается с глубиной, достигая максимальных концентраций на глубинах более 1.5 м по керну. На глубине менее 0.5 м концентрации углеводородных компонент минимальны, концентрации гомологов низки, либо они не определяются вследствие разжижения осадка и активной бактериальной деятельности.

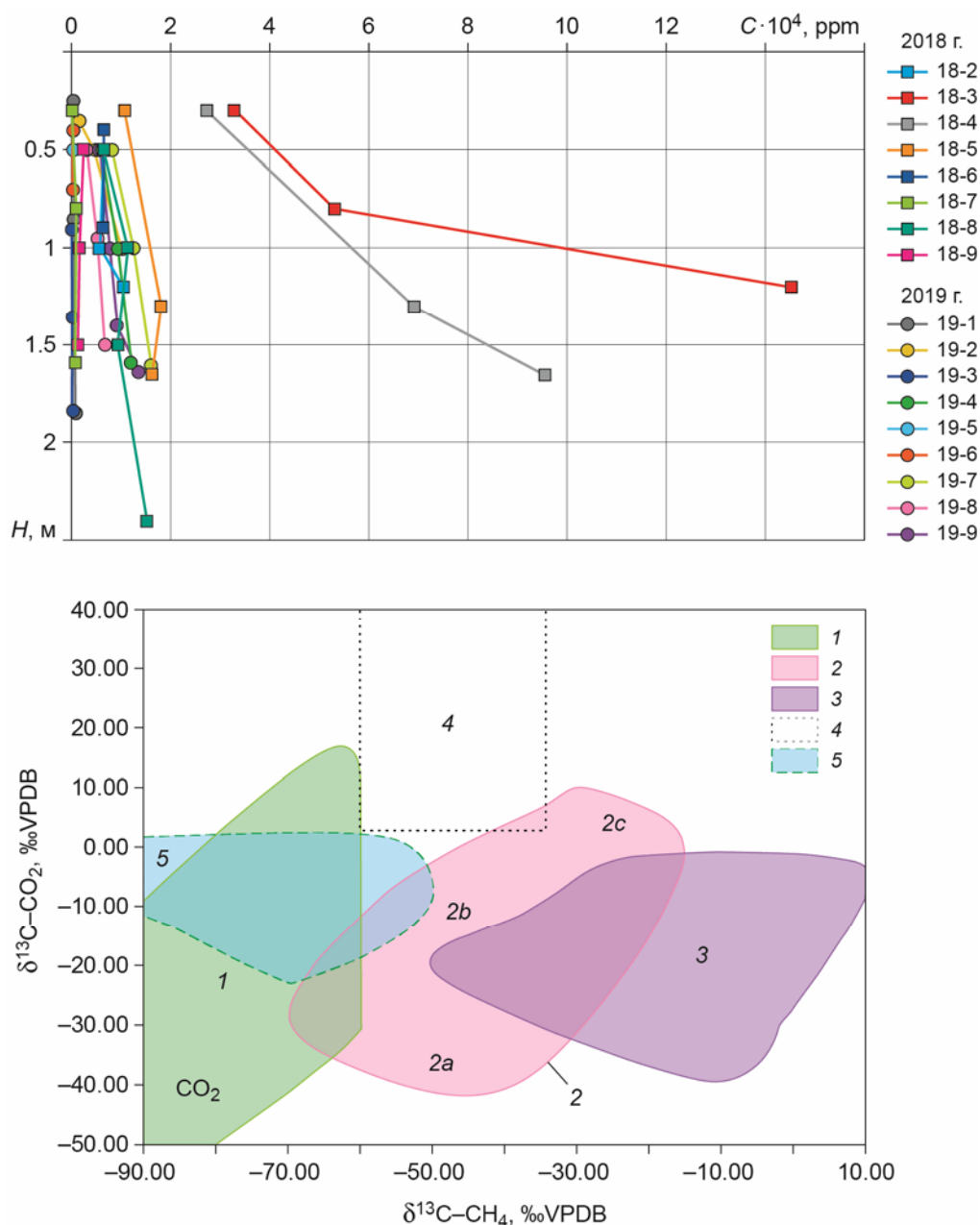


Рис. 6. Вверху: графики распределения концентрации метана (C , ppm) с глубиной (H , м), построенные по данным станций донного пробоотбора, полученным в 2018–2019 гг. (расположение станций см. на рис. 4)

Внизу: зависимость $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ от $\delta^{13}\text{C-CH}_4$, отражающая происхождение газа (по [Milkov, Etiope, 2018] с изменениями). 1 – первичный бактериальный газ; 2 – термгенный газ (2a – низкая зрелость, 2b – газы нефтяные, 2c – высокая зрелость); 3 – абиогенный газ; 4 – вторично бактериальный газ; 5 – границы ферментации

Fig. 6. Above: graphs of the distribution of methane concentration (C , ppm) with depth (H , m), built according to the data of the bottom sampling stations obtained in 2018–2019 (see location of the stations in Fig. 4)

Bottom: dependence of $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ on $\delta^{13}\text{C-CH}_4$, reflecting the origin of the gas (according to [Milkov, Etiope, 2018] with changes). 1 – primary bacterial gas; 2 – thermogenic gas (2a – low maturity, 2b – petroleum gases, 2c – high maturity); 3 – abiogenic gas; 4 – secondary bacterial gas; 5 – fermentation boundaries

Газообразные углеводородные компоненты C_{2+} (до $C_{4H_{10}}$) присутствуют в невысоких концентрациях, коэффициент сухости газа $C_1/C_{2+} > 2000$. Содержание непредельных углеводородов в осадках превышает содержание предельных, что свидетельствует о микробном процессе образования газа.

У пяти образцов был изучен изотопный состав $\delta^{13}C-CH_4$ и $\delta^{13}C-CO_2$. Изотопный состав углерода метана варьировал от -69.42 до -73.63 ‰ VPDB, изотопный состав углерода углекислого газа изменялся от -12.55 до -15.43 ‰ VPDB. Данные результаты подтверждают микробальное происхождение газа (рис. 6, *внизу*).

Кроме того, прямая корреляционная связь между концентрациями метана и углекислого газа, говорит об активизации метан-генерирующих бактерий в осадке вкупе с метан-окисляющими микроорганизмами. При этом с увеличением доли одних возрастает доля других, причем увеличивается не только их биомасса, но и концентрация продуктов жизнедеятельности (рис. 7).

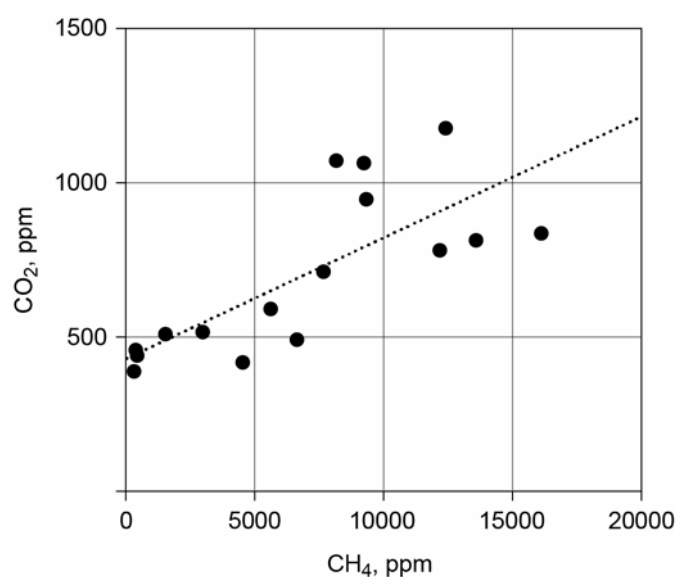


Рис. 7. Зависимость содержания углекислого газа от метана в осадках Онежского озера. Пунктиром показан линейный тренд с коэффициентом детерминации $R^2=0.571$

Fig. 7. Dependence on the content of carbon dioxide and methane in the sediments of Lake Onega. The dotted line shows a linear trend with the coefficient of determination $R^2=0.571$

В отобранных пробах также обнаружено высокое содержание азота и кислорода, преимущественно объясняющееся примесью воздуха, который попал в пробу при “*Head space*” анализе. При этом отмечается значительное уменьшение содержания кислорода по сравнению с воздушной смесью (1.6–14.5 % против 20.94 % в воздухе) и увеличение содержания азота (81–95 % в большинстве образцов против 78.08 % в воздухе). Это говорит о явно невоздушной части не только углеводородной, но и неуглеводородной, преимущественно азотной. Повышенное содержание азотистых газов может объясняться генерацией значительного количества азота сообществами микроорганизмов, находящихся в осадках пресноводных бассейнов седиментации.

Для определения содержания и состава рассеянных в породе битуминозных веществ был проведен люминесцентно-битуминологический анализ [Фроловская, 1957]. Наивысшее содержание битумоида 0.000625–0.00125 % (3–4 балла) определено на станциях донного пробоотбора 19-7, 19-8, 19-9, 18-4 и 18-5. Основное количество

отобранных образцов охарактеризовано содержанием битумоида менее 0.000313 % (1–2 балла) при преобладании легкого и легко-маслянистого битумоида, что характерно для современных осадков с преимущественно автохтонной составляющей органического вещества.

Заключение

В результате работ, выполненных в 2018–2019 гг., удалось получить новую информацию о строении осадочного чехла Заонежского залива Онежского озера. После проведения непрерывного сейсмоакустического профилирования было выделено пять сейсмокомплексов. Строение осадочного чехла на акватории Заонежского залива во многом схоже с тем, что наблюдается в Петрозаводском заливе. Значения характеристик физических свойств донных отложений в обоих районах, рассчитанные по сейсмоакустическим данным, также близки.

Осадочный чехол в Заонежском заливе имеет сложное строение, а мощности его сильно варьируются. Максимальная мощность в центральной части Заонежского залива достигает 35 м. В то же время во многих участках залива, в частности в зоне сочленения Заонежского и Повенецкого заливов, отложения верхнего сеймостратиграфического комплекса могут иметь редуцированную мощность или полностью отсутствовать. Это происходит в зонах повышенной гидродинамической активности, где накопление тонких глинистых осадков невозможно в принципе.

Данные геоэкологического проботоотбора позволили более полно провести литологическое расчленение образцов. Верхняя часть разреза сложена преимущественно нефелоидными глинистыми илами, что характерно также и для Петрозаводской губы. На нескольких станциях донного проботоотбора были отобраны ленточные глины, в том числе и из нижних (проксимальных) горизонтов. К сожалению, все разрезы этих толстослоистых ленточных глин не имеют верхних контактов. Однако можно предположить, что их накопление происходило, по крайней мере, в аллереде, и именно этот период можно считать началом отступления ледника из северной части Онежского залива.

Стоит упомянуть, что моделирование поведения ледника проводилось и в работе [Hang et al., 2019]. Однако сравнивать представленные в ней результаты с нашими было бы корректно только для ледниково-озерных осадков, так как это был единый бассейн, как для Онежского, так и для более мелких озер. При этом, сопоставление озерных осадков было бы неверным, в связи с разными гидрологическими параметрами разных по размеру водоемов. Литологические данные, использовались нами только для общей характеристики осадконакопления и заимствованы из указанных в тексте работ.

Изучение газовой составляющей в донных отложениях показало сильную газонасыщенность голоценовых озерных отложений и преимущественное содержание метана. Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ от $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, коэффициент сухости газа, а также соотношение непредельных гомологов с предельными свидетельствуют о микробиальном происхождении газов. Однако наличие тяжелых газообразных компонентов C_{2+} вплоть до бутана является интересным фактом. Присутствие такого рода соединений обычно характерно для термогенного углеводородного газа, но геологические условия данного района – малая мощность осадочного чехла, температура, недостаточная для термического крекинга углеводородов, – не располагают к процессам нефте-газогенерации. В схожей геологической обстановке, в осадках Белого моря были также обнаружены тяжелые гомологи метана [Токарев и др., 2019], что объясняется процессами анаэробного разложения жирных кислот до высокомолекулярных газов C_3-C_5 [Лисицын и др., 2017].

Благодарности

Авторы выражают благодарность компании ООО “Сплит” и ее сотрудникам, участвовавшим в подготовке и проведении работ на Онежском озере, Карельскому научному центру РАН за предоставление судна “Эколог” и оказанную помощь в проведении работ, а также Субетто Дмитрию Александровичу за активное сотрудничество и участие в исследованиях Онежского озера.

Финансирование

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Литература

- Алешин М.И., Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А. Изучение придонных осадков в Петрозаводской губе Онежского озера с помощью комплексирования геолого-геофизических методов изучения донных отложений // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. № 4. С.98–104.
- Алешин М.И., Миронюк С.Г., Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А., Потемка А.К. Первые итоги изучения покмарок Онежского озера // Процессы в геосредах. 2018. Т. 1, № 14. С.732–740.
- Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В., Филиппова К.Е., Приезжев И.И. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1 // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С.3–16.
- Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А. Геоморфология котловины Ладожского озера. Новые данные // Астраханский вестник экологического образования. 2020. № 5 (59). С.142–154.
- Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Зобков М.Б., Фёдоров Г.Б. Четвертичные отложения и рельеф Онежского озера // Географический вестник. 2021. № 1 (56). С.6–16. doi: 10.17072/2079-7877-2021-1-6-16
- Большаков А.М., Егоров А.В. Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газметрических исследованиях в акваториях // Океанология. 1987. Т. 27, № 5. С.861–862.
- Демидов И.Н. Донные отложения и колебания уровня Онежского озера в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2004. № 7. С.207–218.
- Демидов И.Н. Деградация последнего оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2005. № 8. С.134–142.
- Лисицын А.П., Немировская И.А., Шевченко В.П., Воронцова В.Г. Система Белого моря: Процессы осадкообразования, геология и история. М.: Научный мир, 2017. Т. 4. 1008 с.
- Максимов А.В., Богданов Ю.Б., Воинова О.А., Коссовая О.Л., Бахтеев А.Р., Евдокимова И.О., Горбачевич Н.Р., Ногина М.Ю., Никонова А.С., Суриков С.Н., Чуйко М.А., Шишлянников А.Н., Астафьев Б.Ю., Воинов А.С., Богачев В.А., Яновский А.С., Амонтов А.В., Андросов Е.А., Иванова Н.О., Суслова С.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Р-(35), 36 Петрозаводск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 400 с.
- Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н.И. Филатова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
- Палеолимнология Онежского озера / Под ред. Г.Г. Мартинсон, Н.Н. Давыдова. Л.: Наука, 1976. 202 с.

- Рыбалко А.Е., Журавлев В.А., Семенова Л.Р., Токарев М.Ю. Четвертичные отложения Белого моря и история развития современного Беломорского бассейна в позднем неоплейстоцене-голоцене // Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадкообразования, геология и история. М.: Научный мир, 2017. С.16–84.
- Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А., Корост Д.В., Страховенко В.Д., Кузнецов В.Ю., Савельева Л.А., Кискина А.Р., Белкина Н.А., Беляев П.Ю., Алешин М.И., Костромина Н.А. Опыт комплексного восстановления палеолимнологических условий с помощью геолого-геофизических методов в Онежском озере (Петрозаводская губа) // Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. 1. М.: ИО РАН, 2019. С.185–189.
- Семенович Н.И. Донные отложения Онежского озера / Под ред. С.В. Калесника. Л.: Наука, 1973. 104 с.
- Страховенко В.Д., Субетто Д.А., Овдина Е.А., Белкина Н.А., Ефременко Н.А., Маслов А.В. Современные донные отложения Онежского озера: строение, минеральный состав и систематика редкоземельных элементов // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481, № 4. С.414–417.
- Токарев М.Ю., Полудеткина Е.Н., Старовойтов А.В., Пирогова А.С., Корост С.Р., Ошкин А.Н., Потемка А.К. Характеристика газонасыщенных отложений Кандалакшского залива Белого моря по данным сейсмоакустических и литолого-геохимических исследований // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. № 1. С.117–124.
- Филимонова Л.В., Лаврова Н.Б. Изучение палеогеографии Онежского озера и его бассейна с использованием комплекса методов // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С.86–100.
- Beliaev P., Rybalko A., Subetto D., Tokarev M., Aleshin M. Structure-geomorphological features of the largest lakes of Russian North-West // Limnology and Freshwater Biology. 2020. V. 4. P.515–516. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-515
- Gromig R., Wagner B., Wennrich V., Fedorov G., Saveliyeva L., Lebas E., Krastel S., Brill D., Andreev A., Subetto D., Melles M. Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments // Boreas. 2019. V. 48, N 2. P.330–348. DOI: 10.1111/bor.12379
- Hang T., Gurbich V., Subetto D., Strakhovenko V., Potakhin M., Belkina N., Zobkov M. A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia // Quaternary International. 2019. V. 524. P.13–23. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.03.021
- Lebas E., Gromig R., Krastel S., Wagner B., Fedorov G., Görtz C., Avers T., Subetto D., Naumenko M., Melles M. Pre-glacial and post-glacial history of the Scandinavian Ice Sheet in NW Russia – Evidence from Lake Ladoga // Quaternary Science Reviews. 2021. V. 251, N 106637.
- Milkov A.V., Etiope G. Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of >20,000 samples // Organic Geochemistry. 2018. V. 125. P.109–120.
- Rybalko A.E., Subetto D.A., Tokarev M.Yu., Saveliyeva L.A., Barymova A.A., Belyaev P.Yu., Strakhovenko V.D., Belkina N.A., Potakhin M.S., Fedorov G.B. Lithostratigraphy and features of the paleogeographic development of Lake Onega and the White Sea in the Late Pleistocene and Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2020. V. 4. P.524–526. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-524
- Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega basin to the Salpausselkä end Moraine // Glob. Planet. Chang. 2001. V. 31, N 1-4. P.387–405.
- Strakhovenko V., Subetto D., Hang T., Ovdina E., Danilenko E., Belkina N., Potakhin M., Zobkov M., Gurbich V. Mineral and geochemical composition of the Onega ice lake sediments // Baltica. 2018. V. 31, N 2. P.165–172. <https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.16>
- Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V., Belkina N., Tokarev M., Potakhin M., Aleshin M., Belyaev P., Dubois D., Kuznetsov V., Korost D., Loktev A., Shalaeva N., Kiskina A., Kostromina N., Kublitskiy Yu., Orlov A. Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia) // Minerals. 2020. V. 10, N 11. 20 p. doi: 10.3390/min10110964 www.mdpi.com/journal/minerals
- Zobkov M., Potakhin M., Subetto D., Tarasov A. Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations // J. Paleolimnology. 2019. V. 62, Issue 1. P.53–71. DOI: 10.1007/s10933-019-00075-3

Сведения об авторах

АЛЁШИН Михаил Игоревич – ведущий специалист, ООО “Сплит”, 121205, г. Москва, Территория Сколково инновационного центра, Большой Бульвар, д. 42, стр. 1, эт. 4, пом. 158; инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(495) 419-90-91. E-mail: maan@ifz.ru

ВИДИЩЕВА Олеся Николаевна – аспирант, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7(495) 939-25-59. E-mail: vid6877@yandex.ru

ВАЛИЕВА Эльвина Ильнуровна – студент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел. +7(495) 939-25-59. E-mail: elvinn_v@mail.ru

МИРИНЕЦ Александра Константиновна – специалист камерального отдела, ООО “Сплит”. 121205, г. Москва, Территория Сколково инновационного центра, Большой Бульвар, д. 42, стр. 1, эт. 4, пом. 158. Тел. +7(495) 939-25-59. E-mail: alexandra.mirinets@gmail.com

ЕГОШИНА Евгения Денисовна – студент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел. +7(495) 939-25-59. E-mail: Ksa_100@bk.ru

РЫБАЛКО Александр Евменьевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоморфологии, Институт наук о Земле. 198178, Россия, Санкт-Петербург, 10-я линия Васильевского острова, д. 31-33. Тел. +7(495) 939-25-59. E-mail: alek-rybalko@yandex.ru; rybalko@spbu.ru

ТОКАРЕВ Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел. +7(495) 939-25-59. E-mail: mjtokarev@gmail.com

ПОЛУДЕТКИНА Елена Николаевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел. +7(495) 939-25-59. E-mail: poludetkinaelena@mail.ru

QUATERNARY SEDIMENTS OF THE OPEN PART OF LAKE ONEGA AND THE ZAONEZHISKY BAY

M.I. Aleshin^{1,2}, O.N. Vidischeva³, E.I. Valieva³, A.K. Mirinets¹,
E.D. Egoshina³, A.E. Rybalko⁴, M.J. Tokarev³, E.N. Poludetkina³

¹ LLC “SPLIT”, Moscow, Russia

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴ Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: M.I. Aleshin (e-mail: maan@ifz.ru)

Abstract. This article highlights the results of joint geological, geophysical and geochemical observations of water area of the open part of Lake Onega and the Zaonezhsky Bay, provided in 2018–2019. In order to study the upper part of the geological section of Lake Onega, the structure and properties of bottom sediments, studies were carried out by the method of very high resolution seismic survey, geological sampling with a gravity tube, as well as geochemical analysis of the composition of gas and organic matter in cores. As a result of the interpre-

tation of the obtained materials, authors distinguished five different seismic complexes that include acoustic basement associated with crystalline bedrocks, glacial morainic sediments and lacustrine deposits. For selected horizons, the values of the physical properties of the rocks were calculated, such as the velocity of longitudinal waves, the reflection coefficient and the acoustic impedance. The obtained characteristics of the deposits of the Zaonezhsky Bay are similar to the characteristics of the deposits of the Petrozavodsk Bay. Geoecological sampling data made it possible to carry out a better lithological subdivision of the samples. Geochemical studies showed that biogenic methane is the main component of the gas mixture in sediments.

Keywords: Lake Onega, seismoacoustic profiling, seismostratigraphy, Quaternary sediments, lacustrine deposits, gases in bottom sediments, pockmarks, computer tomography of bottom sediments.

Acknowledgements

Authors are grateful to the company LLC “Split” and its employees who participated in the preparation and implementation of works on Lake Onega; Karelsky Research Center Russian Academy of Sciences for providing the vessel “Ecolog” and assistance in carrying out the work, as well as to Dmitry Alexandrovich Subetto for active cooperation and participation in the research of Lake Onega.

Funding

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00303) and the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00176).

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Aleshin M.I., Gaynanov V.G., Tokarev M.J., Rybalko A.E., Subetto D.A., The study of sub-bottom sediments in Petrozavodsk bay of Lake Onega using complex geological-geophysical methods of data analysis, *Moscow University Geology Bulletin*, 2019, vol. 74, no. 5, pp. 525-531.
- Aleshin M.I., Mironyuk S.G., Rybalko A.E., Tokarev M.Yu., Subetto D.A., Potyomka A.K., First results of the pockmarks of Lake Onega study, *Protsessy v geosredakh* (Processes in geomedias), 2018, vol. 1, no. 14, pp. 732-740. [In Russian].
- Ampilov Yu.P., Barkov A.Yu., Yakovlev I.V., Filippova K.E., Priezzhev I.I., Almost everything about Seismic Inversion. Part 1, *Tekhnologii seismorazvedki* (Seismic Technologies), 2009, vol. 4, pp. 5-16. [In Russian].
- Beliaev P., Rybalko A., Subetto D., Geomorphology of the Lake Ladoga basin. New data, *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* (Astrakhan Bulletin of environmental education), 2020, vol. 5 (59), pp. 142-154. [In Russian]. DOI: 10.36698/2304-5957-2020-19-5-142-154
- Beliaev P., Rybalko A., Subetto D., Tokarev M., Aleshin M., Structure-geomorphological features of the largest lakes of Russian North-West, *Limnology and Freshwater Biology*, 2020, vol. 4, pp. 515-516.
- Belyaev P.Yu., Rybalko A.E., Subetto D.A., Zobkov M.B., Fedorov G.B., Quaternary deposits and geomorphological features of lake Onega, *Geograficheskii vestnik* (Geographical bulletin), 2021, vol. 1 (56), pp. 6-16. [In Russian]. doi: 10.17072/2079-7877-2021-1-6-16
- Bol'shakov A.M., Egorov A.V., Using of phase-equilibrium degassing method for gasometric studies, *Okeanologiya* (Oceanology), 1987, vol. 27, no. 5, pp. 861-862. [In Russian].
- Demidov I.N., Bottom sediments and fluctuations of the level of the Onega Lake in the Late Glacial period, *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* (Geology and mineral resources of Karelia), 2004, vol. 7, pp. 207-218. [In Russian].
- Demidov I.N., Degradation of the Late Valdai Glaciation in the basin of Lake Onega, *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* (Geology and mineral resources of Karelia), 2005, vol. 8, pp. 134-142. [In Russian].

- Filimonova L.V., Lavrova N.B., The study of lake Onego and its drainage basin paleogeography using a set of methods, *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* (Proc. Karelian Sci. Center RAS), 2017, vol. 10, pp. 86-100. [In Russian]. DOI: 10.17076/lim703
- Gromig R., Wagner B., Wennrich V., Fedorov G., Savelieva L., Lebas E., Krastel S., Brill D., Andreev A., Subetto D., Melles M., Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments, *Boreas*, 2019, vol. 48, no. 2, pp. 330-348. DOI: 10.1111/bor.12379
- Hang T., Gurbich V., Subetto D., Strakhovenko V., Potakhin M., Belkina N., Zobkov M., A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia, *Quaternary International*, 2019, vol. 524, pp. 13-23.
- Lebas E., Gromig R., Krastel S., Wagner B., Fedorov G., Görtz C., Averses T., Subetto D., Naumenko M., Melles M., Pre-glacial and post-glacial history of the Scandinavian Ice Sheet in NW Russia – Evidence from Lake Ladoga, *Quaternary Science Reviews*, 2021, vol. 251, no. 106637. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106637>
- Lisitsyn A.P., Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P., Vorontsova V.G., *Sistema Belogo morya: Protsessy osadkoobrazovaniya, geologiya i istoriya* (The White sea system. The processes of sedimentation, geology and history), Moscow: Nauchnyi mir, 2017, vol. 4, 1008 p. [In Russian].
- Maksimov A.V., Bogdanov Yu.B., Voinova O.A., Kossovaya O.L., Bakhteev A.R., Evdokimova I.O., Gorbachevich N.R., Nogina M.Yu., Nikonova A.S., Surikov S.N., Chuiko M.A., Shishlyannikov A.N., Astafev B.Yu., Voinov A.S., Bogachev V.A., Yanovskii A.S., Amontov A.V., Androsov E.A., Ivanova N.O., Suslova S.V., *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Baltiiskaya. List P-(35), 36 Petrozavodsk. Ob'yasnitel'naya zapiska* (State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Series: Baltic. Sheet R-(35), 36 – Petrozavodsk: Explanatory note), Saint-Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2015, 400 p. [In Russian].
- Milkov A.V., Etiope G., Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of >20,000 samples, *Organic Geochemistry*, 2018, vol. 125, pp. 109-120. doi: 10.1016/j.orggeochem.2018.09
- Onezhskoe ozero. Atlas* (Onego Lake. Atlas), Petrozavodsk: Karelskii nauchnyi tsentr RAN, 2010, 151 p. [In Russian].
- Paleolimnologiya Onezhskogo ozera* (Paleolimnology of Lake Onega), Leningrad: Nauka, 1976, 202 p. [In Russian].
- Rybalko A.E., Subetto D.A., Tokarev M.Yu., Savelieva L.A., Barymova A.A., Belyaev P.Yu., Strakhovenko V.D., Belkina N.A., Potakhin M.S., Fedorov G.B., Lithoseismostratigraphy and features of the paleogeographic development of Lake Onega and the White Sea in the Late Pleistocene and Holocene, *Limnology and Freshwater Biology*, 2020, vol. 4, pp. 524-526. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-524
- Rybalko A.E., Tokarev M.Yu., Subetto D.A., Korost D.V., Strakhovenko V.D., Kusnezov V.Yu., Savelieva L.A., Kiskina A.R., Belkina N.A., Belyaev P.Yu., Aleshin M.I., Kostromina N.A., The experience of the integrated reconstruction of the paleolimnological conditions using geological-geophysical methods in the Onega Lake (Petrozavodsk Bay), in *Geologiya morei i okeanov: Materialy XXIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii. Tom 1* (Proceedings of XXIII International Conference on Marine Geology, vol. 1), Moscow: IORAN, 2019, pp. 185-189. [In Russian].
- Rybalko A.E., Zhuravlyov V.A., Semyonova L.R., Tokarev M.Y., Development history and Quaternary deposits of the White Sea basin, in: *Lisitsyn A., Demina L. (eds.) Sedimentation Processes in the White Sea. The Handbook of Environmental Chemistry, Springer, Cham*, 2018, vol. 82, pp. 135-163.
- Saarnisto M., Saarinen T., Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega basin to the Salpausselkä End Moraine, *Glob. Planet. Chang*, 2001, vol. 31, no. 1-4, pp. 387-405.
- Semenovich N.I., *Donnye otlozheniya Onezhskogo ozera* (Bottom Sediments of Lake Onega), Leningrad: Nauka, 1973, 104 p. [In Russian].
- Strakhovenko V., Subetto D., Hang T., Ovdina E., Danilenko E., Belkina N., Potakhin M., Zobkov M., Gurbich V., Mineral and geochemical composition of the Onega ice lake sediments, *Baltica*, 2018, vol. 31, no. 2, pp. 165-172. <https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.16>
- Strakhovenko V.D., Subetto D.A., Ovdina E.A., Belkina N.A., Efremenko N.A., Maslov A.V., Modern Bottom Sediments of Lake Onega: Structure, Mineralogical Composition and Systematization of Rare-Earth Elements, *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 481, no. 2, pp. 988-992. DOI: 10.31857/S086956520001844-1
- Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V., Belkina N., Tokarev M., Potakhin M., Aleshin M., Belyaev P., Dubois D., Kuznetsov V., Korost D., Loktev A., Shalaeva N., Kiskina A., Kostromina N., Kublitskiy Yu., Orlov A., Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onega (NW Russia), *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 11, 20 p. doi: 10.3390/min10110964 www.mdpi.com/journal/minerals

Tokarev M.J., Poludetkina E.N., Starovoitov A.V., Pirogova A.S., Korost S.R., Oshkin A.N., Potemka A.K., The Characteristics of Gas-Saturated Deposits of the Kandalaksha Bay, the White Sea, According to Seismoacoustic and Lithogeochemical Studies, *Moscow University Geology Bulletin*, 2019, vol. 74, pp. 221-228. DOI: 10.3103/S0145875219020108

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D., Tarasov A., Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations, *J. Paleolimnology*, 2019, vol. 62, issue 1, pp. 53-71. DOI: 10.1007/s10933-019-00075-3

About the authors

ALESHIN Mikhail Igorevich – Leading specialist, LLC “Split”. Skolkovo Innovation Center Territory, Bolshoy Boulevard, 42, building 1, floor 4, room 158, Moscow, 121205, Russia; Engineer, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya st., 10, building 1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(926) 220-29-47. E-mail: maan@ifz.ru

VIDISCHEVA Olesya Nikolaevna – Postgraduate student, Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119234, Russia. Ph.: +7(495) 939-25-59. E-mail: vid6877@yandex.ru

VALIEVA Elvina Ilnurovna – student, Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119234, Russia. Ph.: +7(495) 939-25-59. E-mail: elvinn_v@mail.ru

MIRINETS Alexandra Konstantinovna – Office department specialist, LLC “Split”. Skolkovo Innovation Center Territory, Bolshoy Boulevard, 42, building 1, floor 4, room 158, Moscow, 121205, Russia. Ph.: +7(495) 939-25-59. E-mail: alexandra.mirinets@gmail.com

EGOSHINA Evgeniya Denisovna – student, Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119234, Russia. Ph.: +7(495) 939-25-59. E-mail: Ksa_100@bk.ru

RYBALKO Alexander Evmenievich – Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor at the Department of Geomorphology, Institute of Earth Sciences. 10th line of Vasilievsky Island, 31-33, St. Petersburg, 198178, Russia. Ph.: +7(495) 939-25-59. E-mail: alek-rybalko@yandex.ru, rybalko@spbu.ru

TOKAREV Mikhail Yurievich – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119234, Russia. Ph.: +7(495) 939-25-59. E-mail: mjtokarev@gmail.com

POLUDETKINA Elena Nikolaevna – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119234, Russia. Ph.: +7(495) 939-25-59. E-mail: poludetkinaelena@mail.ru