ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ, 2023, том 54, № 4, с. 40–56

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ: ОТ КАЛИНИНГРАДА ДО КАМЧАТКИ

УДК 551.8:556.55(470.2)

ФОРМИРОВАНИЕ КРУПНЕЙШИХ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ ПО ВОСТОЧНОЙ ПЕРИФЕРИИ БАЛТИЙСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЩИТА[#]

© 2023 г. А. Е. Рыбалко[1,2,6,*], Д. А. Субетто[3], Н. А. Белкина[4], В. Д. Страховенко[5], А. О. Аксенов[2,8], П. Ю. Беляев[3,6], М. Ю. Токарев[7], Л. А. Савельева[2], М. С. Потахин[4], А. В. Орлов[3,4], С. Р. Корост[1,7], Ю. А. Кублицкий[3], А. С. Локтев[6]

[1]Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
[2]Институт наук о Земле СПБГУ, Санкт-Петербург, Россия,
[3]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия
[4]Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия
[5]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия
[6]ФГБУ "ВНИИОкеангеология", Санкт-Петербург, Россия
[7]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия
[8]ФГБУ "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт", Санкт-Петербург, Россия
**E-mail: alek-rybalko@yandex.ru*

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.
После доработки 21.07.2023 г.
Принята к публикации 08.09.2023 г.

Начиная с 2014 г., совместный научный коллектив исследователей из Института наук о Земле, Института водных проблем Севера КНЦ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, ФГБУ "ВНИИОкеангеология" и Российского педагогического университета им А.И. Герцена начали Программу по изучению четвертичных отложений двух крупнейших озер европейской части России – Онежского и Ладожского, расположенных по восточной периферии Балтийского (Фенноскандинавского) кристаллического щита. Имея большое количество материалов по этой проблеме и используя новые возможности многоканального сейсмоакустического профилирования и получения кернов с помощью длинных гравитационных трубок, а также новые методы исследования кернов, основное внимание было уделено геологическому развитию этих озер в позднем неоплейстоцене–голоцене. Изучение четвертичных отложений этих озер, занимающих ключевое географическое положение в регионе и располагающихся на различных высотных уровнях, позволяет более точно понять динамику отступления Скандинавского ледника с северо-западной части Русской равнины. При этом определяющее влияние ледника на формирование водных бассейнов при его деградации позволяет провести региональные палеогеографические корреляции, начиная с Балтийского моря, через Ладожское и Онежское озера и заканчивая Белым морем. Значительный интерес представляет и история формирования самих озерных котловин, учитывая, что в них практически отсутствуют отложения фанерозоя и геологический разрез представлен архей-протерозойскими и четвертичными образованиями. В статье обсуждаются новые данные, полученные с помощью многоканального сейсмоакустического профилирования и длинных гравитационных трубок (Онежское озеро) с привлечением результатов математического моделирования о циклическом развитии обоих озерных бассейнов, времени начала и окончания основных циклов (ледникового, ледниково-озерного, озерного) в них. Приведены сведения о корреляции этих событий с палеогеографическим развитием Белого моря.

Ключевые слова: Онежское озеро, Ладожское озеро, сейсмоакустическое профилирование пресноводных бассейнов, четвертичные отложения, верхний неоплейстоцен и голоцен, донные отложения озер, бурение, палеолимнология, палеогеография

DOI: 10.31857/S2949178923040102, **EDN:** GDUAQA

ВВЕДЕНИЕ

История формирования крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского, расположенных по восточной периферии Балтийского кристаллического щита, имеет большое значение для палеогеографии позднего неоплейстоцена–голоцена. Расположение их на различных высотных уровнях позволяет более точно понять динамику отступления Скандинавского ледника. При этом

[#] *Ссылка для цитирования:* Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Белкина Н.А. и др. (2023). Формирование крупнейших озер северо-запада России по восточной периферии Балтийского кристаллического щита // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 4. С. 40–56. https://doi.org/10.31857/S2949178923040102; https://elibrary.ru/GDUAQA

определяющее влияние ледника на формирование водных бассейнов при его деградации позволяет провести региональные корреляции, начиная с Балтийского моря и кончая Белым. Значительный интерес представляет и история формирования самих озерных котловин, учитывая, что в них практически отсутствуют отложения фанерозоя.

Впервые вопрос о синхронизации четвертичных отложений был поставлен в 1998 г. (Рыбалко, 1998), когда были проведены геолого-геофизические работы в Белом и Балтийском морях. Однако в это время аналогичные данные по озерам и, особенно, по Онежскому, были еще недостаточны. В силу ряда обстоятельств геофизические работы и пробоотбор длинными гравитационными трубками в акватории озерных котловин начались значительно позже, чем в морях. Однако в последние 8 лет на обоих озерах было проведено многоканальное сейсмоакустическое профилирование высокого разрешения (Алешин и др., 2019; Аксенов и др., 2020; Aksenov et al., 2020; Subetto et al., 2020; Lebas et al., 2021). Геологическое опробование с гравитационными трубками длиной в 3 м в эти же годы проводилось на Онежском озере (Палеолимнология, 2022). В результате была представлена новая версия карты четвертичных отложений озера (Беляев и др., 2021). Результаты исследований в донных отложениях малых озер по периферии Онежского озера позволили существенно уточнить его развитие в позднем неоплейстоцене-голоцене (Zobkov et al., 2019; Subetto et al., 2020). Наиболее полное развитие палеогеографические исследования получили в онежской котловине (Палеолимнология..., 2022).

Накопившиеся, хотя и разнородные, данные по озерам и внутренним морям, расположенным также по периферии Балтийского кристаллического щита, позволяют более подробно осветить как историю формирования самих озерных котловин, так и образование в них в позднем неоплейстоцене приледниковых бассейнов, сменившихся позднее морскими и озерными бассейнами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основу содержания статьи положены результаты полевых работ на Ладожском и Онежском озерах в период с 2014 по 2020 г. На первом этапе это был смешанный коллектив исследователей из СПБГУ, МГУ им. М.В. Ломоносова и Института водных проблем Карельского научного Центра РАН (Петрозаводск). С 2014 г. эти исследования стали поддерживаться грантами РНФ 14-17-00766, 18-17-00176 и 20-17-00176П, квинтэссенцией которых стало издание монографии “Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям” (2022), в которой подробно описаны литология и условия образования четвертичных отложений озера.

Ладожское и Онежское озера расположены в северо-западной части РФ и являются крупнейшими озерами Европы (рис. 1). Площадь акватории первого составляет 17870 км^2, наибольшая глубина 230 м, а второго – 9720 км^2 и 127 м соответственно (Максимов и др., 2015). Морфология озер при их различии имеет и общие черты. Морфология северных берегов, где вскрываются кристаллические породы Балтийского щита, имеет шхерный (в Ладожском озере) и фиардообразный (в Онежском озере) характер. Меридиональные профили этих озер асимметричны. В открытой части их располагаются участки озерного дна с максимальными глубинами, которые постепенно уменьшаются на юг. Южные берега, наоборот, характеризуются наличием широких пологих бухт, образование которых во многом связано с экзарацией отдельными ледниковыми потоками, выходящих на Русскую равнину.

В 2014–2015 гг. были проведены геофизические (сейсмоакустические) работы на Ладожском озере, а с 2016 г. они были перенесены на Онежское озеро, причем к сейсмоакустическим исследованиям добавился и геологический пробоотбор.

Геофизические работы включали многоканальное сейсмоакустическое профилирование высокого разрешения. В 2014 г. использовались электродинамический источник энергии типа “Бумер” с центральной частотой 2000 Гц и сейсмическая аналоговая шестнадцатиканальная коса с шагом 2 м между приемниками. В 2015 г. применялся электроискровой излучатель (“Спаркер”), помещенный в контейнер с соленой водой. Частота излучения его соответствовала характеристикам сейсморазведки высокого разрешения (ССВР) и составляла 300–700 Гц. Приемная система была представлена пьезокерамической 16-канальной косой с расстоянием между каналами 2 м. На Онежском озере непрерывное сейсмоакустическое профилирование проводилось с использованием низкочастотной и высокочастотной методик. Подобная методика была использована для одновременного повышения глубинности зондирования и более дробного расчленения верней части разреза донных отложений. Для низкочастотного профилирования использовался электроискровой излучатель (“Спаркер”) с контейнером с соленой водой и частотой излучения – 600 Гц. Профилирование по высокочастотной методике проводилось с применением электродинамического излучателя (“Бумер”) с центральной частотой излучения 1.2 кГц. Дополнительно для обследования поверхности озерного дна и выделения на ней геологических и антропогенных объектов была выполнена гидролокация бокового обзора (аппаратурный комплекс StarFish 450F) (Алешин и др., 2021б). В пределах открытой части озера (2017, 2019 г.) непрерывное сейсмоакустическое профи-



Рис. 1. Положение на карте Ладожского и Онежского озер. *Точками обозначены места бурения в озерах:* 1 – отбора колонки в рамках проекта PLOT (Andreevetal., 2019), 2 – отбора колонок донных отложений в Петрозаводской губе Онежского озера (Палеолимнология..., 2022), 3 – отбора колонок донных отложений в Уницкой губе Онежского озера.

Fig. 1. Location of Ladoga and Onega lakes. *White points are the coring sites:* 1 – the PLOT coring site (Andreev et al., 2019), 2 – the coring site in the Petrozavodskaya bay (Onega Lake) (Paleolimnologya..., 2022), 3 – the coring site in the Unitskaya bay (Onega Lake).

лирование проводилось преимущественно с электроискровым источником акустических сигналов “Спаркер”. Все эти работы были выполнены сотрудниками ООО “Сплит” и ЦМИ МГУ на основании Договоров о научном сотрудничестве.

Геологический пробоотбор на Онежском озере проводился в 2016, 2018, 2020 и 2022 г. Использовалась гравитационная трубка длиной 3 м и весом до 500 кг, что позволило получить керны длиной до 2.5 м. В 2019 г. было впервые проведено бурение четвертичных отложений со льда. Была задействована поршневая система для отбора колонок донных отложений производства UWITEC (Австрия). Возможности этой системы позволяют бурить озерное дно на глубинах до 140 м и отбирать керны донных отложений длиной до 20–25 м. С помощью этой буровой установки было получено 4 керна длиной 10–12 м на глубинах около 20 м. Диаметр керна составлял 89 мм (Палеолимнология..., 2022). Также производилось бурение с плота (летом) и со льда (зимой) в губах и малых озерах по периферии Онежского озера с помощью торфяного бура (Zobkov et al., 2019).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Одной из характерных черт геологического строения всех без исключения внутренних бассейнов по восточной периферии Балтийского кристаллического щита является почти полное отсутствие в них фанерозойских отложений. Как и на самом щите, здесь четвертичные отложения перекрывают непосредственно образования нижнего и верхнего протерозоя. Только в южных частях в дочетвертичном разрезе в пределах озерных котловин появляются нижнепалеозойские породы (Амантов, Спиридонов,1989; Палеолимнология..., 2022). Это связано с тем, что южная часть озерных котловин представляет обширные депрессии, выработанные уже в породах плитного чехла.

Формирование впадин по восточной периферии Балтийского кристаллического щита, где впоследствии образовались Ладожское и Онежское озера, произошло в позднем протерозое в результате деструкционных процессов в доплатформенный период развития Русской платформы. Однако эти процессы протекали неодинаково. Ладожское озеро располагалось в узком авлакогенном прогибе, который, в свою очередь, унаследовал положение

палеопротерозойских коллизионных поясов (Балуев и др., 2012). Северная часть Онежского озера пространственно совпадает с позднепротерозойской Онежской структурой (ОПС) (Онежская..., 2011). Ее причудливый структурный план предопределил специфику орографии этой части озера. В течение фанерозоя территория Балтийского кристаллического щита испытывала устойчивые восходящие движения, вследствие чего, как уже упоминалось, верхнепротерозойские и нижнепалеозойские породы сохранились только в пределах плитного чехла (Балуев и др., 2012).

В четвертичное время все отрицательные формы дочетвертичного рельефа стали путями для распространения ледниковых языков валдайского оледенения. Несколько циклов оледенения привели к тому, что наступающими ледниками не только были уничтожены массивы относительно маломощных палеозойских пород, но и каждый более молодой ледник практически полностью уничтожал в результате экзарации ранее сформировавшиеся рыхлые отложения. Вследствие этого в Ладожском и Онежском озерах вскрываются только отложения последнего гляциального цикла: верхневалдайская морена, флювиогляциальные и лимногляциальные позднеледниковые и современные озерные отложения. В Ладожском озере по данным бурения совместной Российско-Германской экспедиции было установлено наличие микулино-нижневалдайских отложений (Andreev et al., 2019; Gromig et al., 2019; Lebas et al., 2021). Однако это противоречит нашим данным, о чем подробнее будет сказано ниже.

Морфология дна обоих озер различна. В северной части Ладожского озера находится глубоководная котловина, которая отделена Валаамским порогом от плоской равнины центральной и южной частей озера. В то же время в центре этой равнины озеро пересекает комплекс гряд ледникового и флювиогляциального происхождения. В Онежском озере северную часть занимают фиардовые заливы. В самом восточном из них (Повенецком заливе) нами установлены озовые гряды, которые пересекают фиард в его средней части. Мы сопоставляем комплекс этих гряд с краевыми образованиями невской стадией поздневалдайского (осташковского) оледенения. Озовые гряды хорошо выделяются по данным сейсмоакустического профилирования, что было показано нами на примере Петрозаводской губы Онежского озера (Алешин, 2021б), а также они были выделены в центральной части Ладожского озера (Аксенов и др., 2020; Aksenov et al., 2020). Геологическая заверка данных сейсмоакустического профилирования была получена в результате бурения четвертичного разреза со льда в Петрозаводской губе (Рыбалко и др., 2020а; Палелимнология..., 2022). Скважина SP-0002 (рис. 1) вскрыла плотные песчано-глинистые осадки (алевритовые миктиты) серого и темно-серого цвета с большим количеством обломков кристаллических пород. Осадки характеризуются типичной “кексоподобной” текстурой (Рыбалко и др., 2020а), характерной для моренных отложений.

Представление о структуре надледниковых отложений в обоих озерах были получены, благодаря сейсмоакустическим исследованиям (Алешин, 2021б; Палеолимнология..., 2022). Наиболее полная сейсмостратиграфическая характеристика четвертичных отложений была установлена в Петрозаводской губе Онежского озера. Она имеет следующий вид (рис. 2). На рисунке четко выделяются несколько отражающих горизонтов. Наиболее глубоким из них является горизонт AF, который представляет поверхность акустического фундамента, сложенного протерозойскими породами Петрозаводской свиты (Максимов и др., 2015). Генетическая трактовка данного отражающего горизонта приведена на основании опыта работ полученного нами и другими авторами во внутренних бассейнах Северо-Запада России, где эта граница всегда сопоставлялась с кровлей кристаллического фундамента (Амантов, Амантова, 2014; Рыбалко и др., 2017б).

Расположенный выше отражающий горизонт G выделяется на большей части Онежского озера. Часто он сливается с рефлектором AF, так как высокочастотная методика, использованная при работах, не всегда позволяла пройти всю толщу отложений, заключенную между отражающими горизонтами (ОГ), и акустический сигнал не достигал подошвы рыхлых отложений. В этом случае происходило слияние этих двух рефлекторов и на сейсмограмме они отражаются как единый горизонт G/AF (рис. 2). Иногда он выходит и на поверхность озерного дна, где приурочен также к грядообразным формам рельефа или поднятиям кристаллического фундамента. Интенсивное отражение акустического сигнала от этого горизонта, благодаря чему он хорошо выделяется на сейсмограммах, связано с высокой плотностью подстилающих отложений.

Толща, расположенная между отражающими горизонтами AF и G или залегающая ниже ОГ G/AF, характеризуется специфической хаотичной записью, отражающей, по мнению многих авторов, чешуйчатое строение отложений, слагающих эту толщу. Опираясь на свой опыт и данные других авторов, мы интерпретируем эту толщу как ледниковую (основную или донную морену) осташковского возраста (Амантов, Амантова, 2014; Шалаева, Старовойтов, 2010).

Особое место занимает отражающий горизонт FG, который имеет локальное развитие и встречается как в Петрозаводской губе (рис. 2), так и в Повенецком заливе Онежского озера. На представленной сейсмограмме данный ОГ проходит

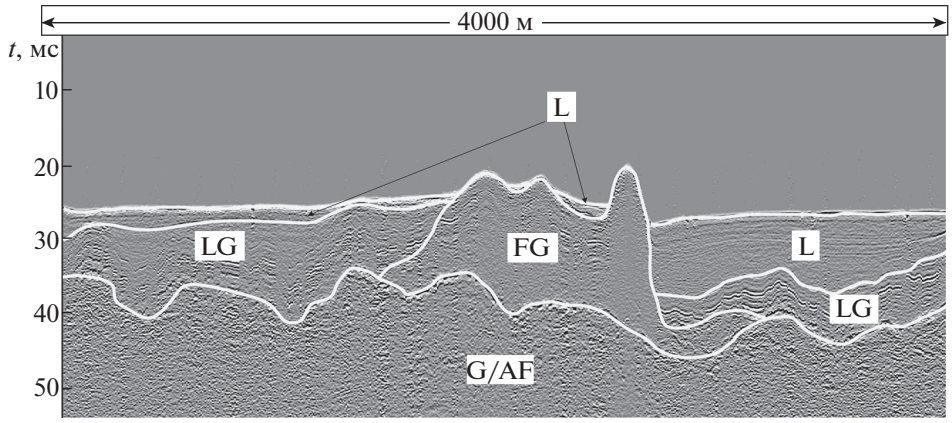


Рис. 2. Сейсмостратиграфическая схема четвертичных отложений Онежского озера. Основана на сейсмоакустических профилях, полученных в Петрозаводской губе Онежского озера в 2016 г. Белые линии – отражающие сейсмоакустические горизонты. Буквенные обозначения – названия отражающих горизонтов. Описания и названия горизонтов даны в тексте.

Fig. 2. Seismic stratigraphic scheme of the quaternary deposits of Onega Lake. Based on 2016 seismic-acoustic profiles from the Petrozavodskaya bay. White lines – reflecting horizons. Description in the text.

по поверхности гряды в центральной части губы, а также, частично, справа от гряды по поверхности погребенного тела между рефлекторами L и G/AF. Это тело и гряда по характеру сейсмозаписи составляют одно целое. Осадки, выполняющие это тело, залегают на ледниковых отложениях (донной морене) и перекрыты "слоистыми" осадками, формирование которых происходило в бассейновых условиях. Это позволяет соотнести описываемые осадки с флювиогляциальными отложениями осташковского возраста. Саму гряду можно интерпретировать как подводный оз. Это предположение подтверждается как морфологией гряды, так и результатами бурения со льда, которое было проведено в непосредственной близости от нее, в результате чего была вскрыта в основании разреза толща разнозернистых, практически отмытых песков, содержащих редкую гальку. Сами отложения, слагающие озоподобную гряду, имеют повышенную плотность, о чем свидетельствует четко выделяющийся рефлектор FG, характеризующий ее кровлю. Важно, что сама гряда, по данным НСП, приурочена к ложбине в кровле дочетвертичного фундамента, что можно интерпретировать как палеодолину стока ледниковых вод (Алешин и др., 2021б).

Отражающая граница LG, расположенная выше ОГ G/AF и хорошо выделяющаяся практически на всем Онежском озере, разделяет осадочные образования, характеризующиеся отчетливой субгоризонтальной слоистостью и перекрывающие их полупрозрачные осадки с волнистой слоистостью. Текстурные особенности, имеющие повсеместное распространение, а также данные геологического пробоотбора, однозначно позволяют сопоставить эти слоистые осадки с толщей ленточных глин. Это, в свою очередь, позволяет отнести эту толщу к ледниково-озерным отложениям осташковского оледенения (Saarnisto, Saarinen, 2001; Субетто, 2009; Рыбалко и др., 2017; Алешин и др., 2021б; Беляев и др., 2021). Возраст и генезис данных отложений подтвержден и результатами палинологического анализа. Было установлено, что их формирование происходило во временном диапазоне от аллереда до верхнего дриаса, а сами палинологические спектры свидетельствуют, что на берегах в это время были развиты тундровые и лесотундровые ландшафты (Savelieva et al., 2018). Сам же отражающий горизонт LG представляет собой раздел между голоценовыми озерными и ледниково-озерными верхненеоплейстоценовыми отложениями. Очень четко этот горизонт проявляется на рентгенограммах кернов (рис. 3).

На рисунке виден эрозионный контакт в кровле лимногляциальных глин, подчеркиваемый тонким песчаным прослоем с неровной нижней и выровненной верхней границами. В приконтактовой зоне могут появляться обломки гравийной и даже галечной размерности, резко возрастает плотность осадка. Различный характер слоистой текстуры указывает на глубину эрозионного среза: более мощные слойки, в целом, соответствуют нижним частям разреза. Полученные данные свидетельствуют, что часто смена ледниково-озерного седиментогенеза озерным сопровождалась размывом кровли осадков, накапливающихся перед фронтом ледника. В ряде колонок донных отложений отмечался и более постепенный характер перехода одного типа осадков в другой, но самым общим признаком этого перехода является появление в разрезе тонких супесчаных слойков, что и является верхней границей совместного влияния на седиментогенез ледникового стока и озерной нефелоидной аккумуляции.

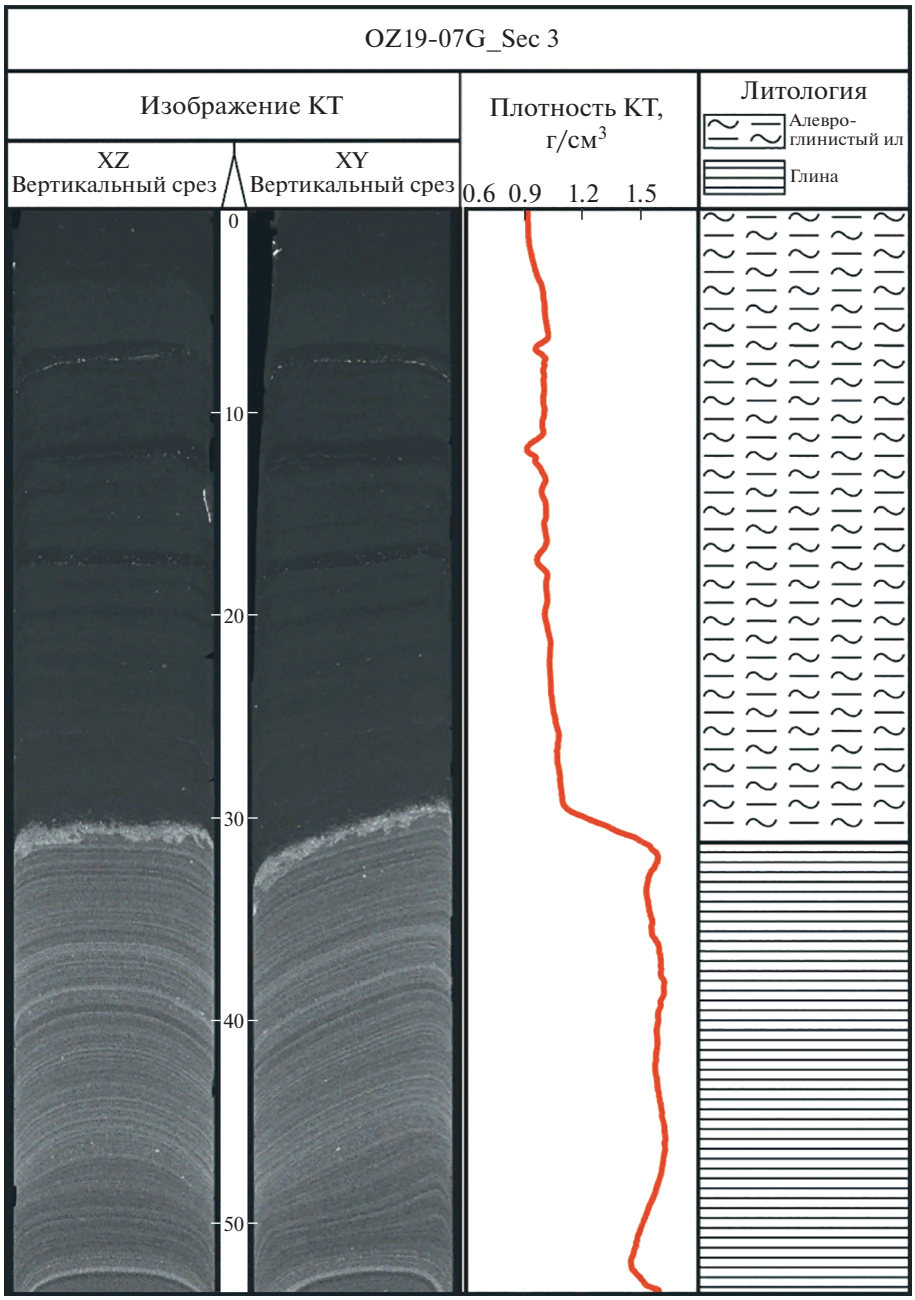


Рис. 3. Эрозионный контакт в кровле лимногляциальных глин. Рентгенограмма керна грунтовой колонки (Повенецкий залив).

Fig. 3. Erosional contact at the top of the limnoglacial clays. X-ray image of the core from Povenetskiy bay.

Между поверхностью озерного дна (отражающий горизонт L) и отражающим горизонтом LG находится толща осадков, характеризующаяся акустически прозрачной волновой картиной, иногда с намечающейся слоистостью. Геологический пробоотбор в различных районах Онежского озера показывает, что данный поверхностный горизонт сложен пелитами и алевропелитами зеленоватых и буроватых оттенков с текучей и текуче-пластичной консистенцией с черными стяжениями гидроксидов марганца, которые относятся к нефелоидным озерным отложениям голоценового возраста.

Таким образом, можно уверенно связывать формирование современного Онежского озера с последним (осташковским) оледенением и его дегляциацией в поздне-послеледниковое время. В ледниковое время в результате экзарации происходила моделировка первично структурно-предопределенного рельефа. Во время дегляциа-

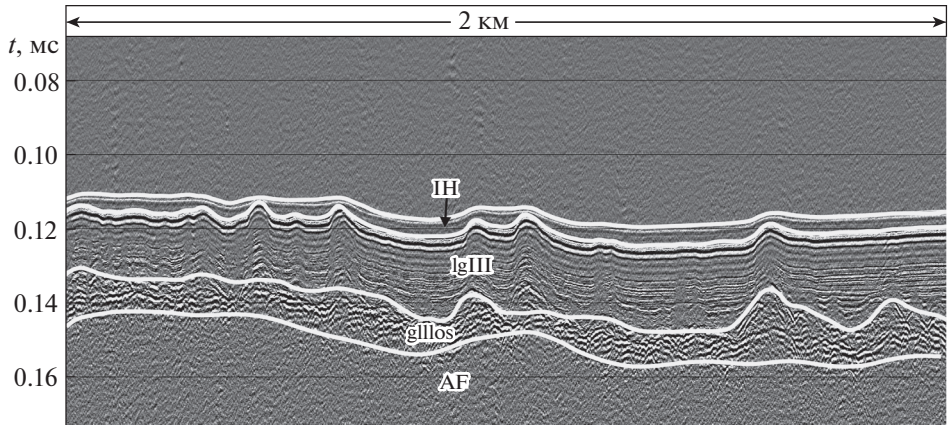


Рис. 4. Типичный разрез толщи четвертичных отложений на дне Ладожского озера по данным сейсмоакустического профилирования (ООО “Сплит”, Москва).

Fig. 4. Typical section of the quaternary sediments at the bottom of Ladoga Lake based on seismic-acoustic data (LLC “Split”, Moscow).

ции онежской впадины на ее дне возникло множество аккумулятивных форм как в виде отложений донной или основной морены, так и гряд, маркирующих зоны распространения отдельных языков ледника. Эти гряды сложены как мореной, так и гравийно-песчаными отложениями флювиогляциального генезиса, в результате чего возник грядовый аккумулятивный рельеф в зонах относительно долгого стояния ледника. Именно эти гряды, в сочетании с экзарационными депрессионными формами рельефа, создают пересеченный характер озерного и морского дна, столь характерный для крупных водоемов ледниковой зоны.

Позднее все неровности доледникового и ледникового рельефа были снивелированы ледниково-озерными и, собственно, озерными отложениями.

Близкий по характеру разрез четвертичных отложений имеет и Ладожское озеро. Здесь геофизические работы проходили в 2014–2015 гг., а для интерпретации использовались материалы, полученные авторами ранее (Субетто, 2009; Subetto et al., 1998). Кроме того, некоторые из авторов участвовали в российско-германской экспедиции (проект “PLOT”, Gromig et al., 2019), в которой в 2013 г. были выполнены площадные геофизические работы. На основании их интерпретации были пробурены две скважины в северо-восточной части Ладоги, к северу от о. Коневец (Lebas et al., 2021). В наиболее длинной из них (скважина Co1309) был получен керн четвертичных отложений длиной 22.7 м при глубине воды 111 м. В нем последовательно представлены (сверху вниз) голоценовые илы и алевриты (литотипы Va, Vb), ленточные глины верхнего неоплейстоцена (литотипы IVa, IVb), морские осадки начала валдайского оледенения, а также микулинского межледниковья (литотипы I–III). При этом ледниковых отложений последнего оледенения (валунные суглинки), разделяющих отложения МИС 2 и МИС 5e не было обнаружено (Andreev et al., 2019; Gromig et al., 2019; Lebas et al., 2019). Однако результаты нашего сейсмоакустического профилирования, выполненного в 2014 г. (Рыбалко и др., 2019б; Беляев и др., 2021), показали, что отражающий горизонт, сопоставляемый с кровлей морены осташковского оледенения, в районе скважины Co1309 располагается существенно ниже ее забоя. При этом сама скважина была остановлена в тяжелых грунтах – красных песчанистых осадках, которые по внешнему облику никак не похожи на мгинские глины, которые в данном районе отлагались в микулинское межледниковье (Знаменская, Черемсинова, 1962.; Максимов и др., 2015). Кроме того, сейсмопачки, коррелируемые с литотипами I–III, характеризуются несколькими типами записи, латерально переходящими друг в друга (субгоризонтально-слоистый, наклонный клиноформный, хаотический), что не позволяет отнести их к бассейновым отложениям. Таким образом, наличие мгинских (эемских) отложений на дне Ладожского озера весьма дискуссионно.

Практически на всем Ладожском озере в толще рыхлых (четвертичных) отложений можно выделить несколько четких отражающих горизонтов, между которыми залегают различные сейсмостратиграфические горизонты (рис. 4).

Непосредственно на образованиях акустического фундамента (AF), который представлен кристаллическими породами архей-нижнепротерозойского возраста, залегают отложения, характеризующиеся хаотической записью с короткими четкими рефлекторами. Эта толща по данным немногочисленного относительно глубокого геологического пробоотбора (Subetto et al., 1998) вклю-

чая неопубликованные данные ВСЕГЕИ о геологической съемке у Приозерска в 1984 г., а также данные по внутренним морским бассейнам (Белое и Балтийское моря) (Рыбалко, 1999), была отнесена к основной морене осташковской стадии валдайского оледенения.

При этом кровля данного горизонта без труда прослеживается на сейсмограммах и, как сказано выше, в точке бурения проекта PLOT явно уходит ниже забоя скважины. Это обстоятельство и является одним из оснований считать, что на дне Ладожского озера отложения древнее МИС3 отсутствуют. К этой же точке зрения склоняется и А.В. Лудикова, изучавшая диатомовую флору в керне скважины Co1309 (Ludikova et al., 2021).

Сейсмофациальным аналогом этой толщи являются отложения с частичной акустической прозрачностью и, местами, со слабо выраженной субгоризонтальной слоистостью. При этом иногда наблюдается отчетливое налегание отложений этой сейсмопачки на моренные отложения, причем контакт в некоторых случаях имеет наклонный характер. Иногда эти отложения залегают непосредственно на породах акустического фундамента. Характер записи указывает на песчанистый состав вмещающей толщи, слагающей этот подгоризонт. Эти данные позволили сопоставить эту толщу (сейсмопачку) с флювиогляциальными отложениями осташковской стадии оледенения (Аксенов и др., 2020; Aksenov et al., 2020).

Выше залегает сейсмоакустический горизонт с четкой субгоризонтальной слоистостью. Он перекрывает горизонт моренных глин. Нижний контакт их четкий, но неровный. Внутри этого сейсмического горизонта по характеру записи выделяют три подгоризонта. Нижний из них характеризуется четкими неровными рефлекторами различной толщины. Выше залегающие осадки имеют тонкие невыраженные рефлекторы, количество которых обычно больше, чем в двух других подгоризонтах. В наиболее верхнем горизонте можно наблюдать ярко выраженные и четкие рефлекторы, но при этом мощность акустических “слойков” становится минимальной. Согласно ранее полученным нами данным (Субетто, 2009), два верхних сейсмических подгоризонта соответствуют литостратиграфическим горизонтам ленточноподобных глин ($lgIII_1$), ленточных глин ($lgIII_2$) и микрослоистых глин ($lgIII_3$), накапливающихся в приледниковых бассейнах, последовательно сменяющих друг друга, начиная с образования приледникового озера (озера Рамзая по Д.Д. Квасову (1976)) и кончая осцилляцией ледника Сальпауселькя III (Gromig et al., 2019). Наиболее древний подгоризонт, вероятно, соответствует отложениям первых приледниковых бассейнов, которые заполнили ладожскую котловину и имеют возраст более 14000 л. н. (Subetto et al., 1998; Gromig et al., 2019). Трехчленное строение горизонта ледниково-озерных осадков было установлено и для отложений Онежского озера (Палеолимнология..., 2022).

Разрез четвертичных отложений Ладожского озера венчает сейсмогоризонт, представленный полупрозрачными осадками с горизонтальной слоистостью, с тонкими, не явно и слабо выраженными рефлекторами. Он коррелируется с голоценовыми озерными отложениями (Рыбалко и др., 2015, Рыбалко и др., 2019а; Aksenov et al., 2020).

Таким образом, строение четвертичных отложений как в Онежском, так и в Ладожском озерах оказалось весьма похожим, что указывает на сходство процессов рельефообразования и осадконакопления в позднем неоплейстоцене-голоцене. Одним из общих признаков является цикличность, выражающаяся в смене ледникового и флювиогляциального цикла седиментогенеза на стадии деградации Скандинавского ледника (Осташковская стадия) лимногляциальным, который отражал неравномерное отступание ледника, прерываемое короткими его осцилляционными надвигами.

Принципиальным вопросом при сходстве в разрезе является время начала дегляциации в обоих озерных бассейнах, тем более что они находятся на разной высоте над уровнем моря (Ладожское озеро – +5 м, Онежское озеро – +33.3 м). Наиболее полные данные в настоящее время получены для Онежского бассейна. Проведенные биостратиграфические и варвохронологические исследования донных отложений показали, что Онежское приледниковое озеро начало формироваться во время интерстадиального потепления аллеред, около 14500 л. н. (Saarnisto, Saarinen, 2001; Savelieva et al., 2018; Hang et al., 2019; Палеолимнология..., 2022). Освобождение южной и центральной частей озера от ледяного покрова произошло около 14000 л. н. По данным изучения колонки из центральной части Онежского озера, формирование ленточных глин завершилось в середине верхнего дриаса (Лаврова, 2005), а согласно данным финских исследователей (Saarnisto, Saarinen, 2001), даже до начала верхнего дриаса, что совпадает и с нашими данными (Палеолимнология..., 2022). В самом начале развития Онежского озера его берега были, вероятно, покрыты льдом или представляли собой открытые скальные выходы с локальным развитием незакрепленного покрова четвертичных отложений. Перигляциальная растительность начала здесь развиваться в позднем дриасе, причем климат был иссушенный, нивальный. В это время в северной части Онежского озера накапливались серые гомогенные текуче-пластичные глины, что дает ос-

нование считать, что сам ледник в это время отступил с водосборного бассейна Онежского озера и пульсационное поступление обломочного материала из тающего ледника в озеро практически прекратилось, однако существенную роль играл эоловый перенос материала. При этом в конце позднего дриаса произошло падение уровня самого приледникового бассейна (Демидов, 2004; Hang et al., 2019; Zobkov et al., 2019).

В Ладожском озере единственным источником данных о начале образования приледникового озера являются материалы бурения 2013 г. Согласно этим данным, накопление ленточных глин началось 13 900 кал. л. н. и происходило до 11 380 кал. л. н. (Gromig et al., 2019; Savelieva et al., 2019). Смена лесотундровой на тундровую на территории Приладожья произошла около 12 600 кал. л. н. на рубеже аллеред–поздний дриас (Saveljeva et al., 2019, табл. 1), что указывает, как мы уже отмечали ранее, на кратковременное наступление ледника вплоть до северо-западных границ озера.

В Онежском озере биостратиграфическое расчленение четвертичных отложений опирается на результаты палинологического анализа колонок ONG-2 и ONG-5 из Петрозаводской губы (Рыбалко и др., 2019а; Saveljeva et al., 2018). В основании разреза в них была пачка серых ленточных глин с неправильной цветовой цикличной слоистостью. Они были перекрыты толщей типичных ленточных глин с градационной текстурой, причем на станции ONG-5 внутри этой толщи был выделен так называемый “горизонт розовых глин”.

Выше по разрезу, как и в Ладожском озере, залегает пачка гомогенных алевропелитов и пелитов пепельно-серого цвета, в которых отмечались отдельные скопления аутигенных сульфидов в виде черных мелких пятен. Венчает разрез толща озерных илов или озерных нефелоидов, в составе которых выделяются (снизу вверх):

– пачка серых алевропелитов с нечеткой диагенетической полосчатостью, чередованием полос зеленоватого оттенка (вивианит) и черного цвета (окисные минералы марганца);

– пачка, сложенная глинистыми алевритами, алевропелитами и пелитами серого цвета с мелкими стяжениями марганцовистых минералов в нижней части интервала;

– пачка пелитовых алевритов или алевропелитов зеленовато-бурого до оливково серого цвета с пятнообразными скоплениями аутигенных минералов марганца. Консистенция этих осадков практически всегда текучая. Часто толща озерных илов перекрывает подстилающие образования с четким эрозионным контактом, что подчеркивается скоплением песчаного материала.

Данные палинологического анализа свидетельствуют, что накопление пепельно-серых глин, перекрывающих ленточнослоистые осадки, происходило не в пребореале, как это было установлено для Ладожского озера (Субетто и др., 2009; Saveljeva et al., 2018), а продолжалось в позднем дриасе, т.е. отступление ледника из онежской впадины произошло раньше, чем из ладожской. Полученные данные и анализ материалов предшественников указывают, что разница времени дегляциации Онежского и Ладожского озер составляет более 1000 лет. В Приладожье в течение интерстадиального потепления аллеред уже отмечалось более значительное развитие еловых лесов, чем в Прионежье. Во время похолодания позднего дриаса на всем протяжении от Финского залива Балтийского моря до Заонежья произошло общее обеднение флоры, выпадение из ее состава ели и сосны. На всей этой территории в это время преобладали однообразные тундровые ландшафты с участием перигляциальной флоры и преобладанием ксерофитных сообществ. Наступившее в начале голоцена (пребореальный период) глобальное потепление климата и отепляющее воздействие Балтийского моря привели к более быстрой деградации и полному исчезновению перигляциальной флоры в Приладожье и развитию здесь открытых березовых и сосновых лесов. А во впадине Онежского озера, в том числе на современных его берегах в это время еще сохранялись массивы мертвого льда, которые, по-видимому, препятствовали быстрому распространению древесной растительности и способствовали сохранению тундровых сообществ (Savelieva et al., 2018). Сопоставление результатов спорово-пыльцевого анализа, биостратиграфического расчленения донных отложений Онежского (колонки ONG-2 и ONG-5) и Ладожского (колонка Co1309) озер, корреляция полученных данных с возрастной моделью по колонке 1309 (Savelieva et al., 2019), а также основные этапы развития растительности на берегах пра-Ладоги и пра-Онеги в позднe- и послеледниковье приведены в табл. 1.

Рассмотренные выше особенности формирования четвертичного осадочного покрова и рельефа дна присущи и морским внутренним бассейнам, также приуроченным к периферии Балтийского (Фенноскандинавского) кристаллического щита (Балтийское и Белое моря). Так, в Белом море, по данным геологического картирования, было установлено, что первые приледниковые озерные бассейны возникли в раннем дриасе и даже раньше, около 13 000 ^{14}C л. н. При этом по мере проникновения морских вод через Горло Белого моря в аллереде (около 11 600 ^{14}C л. н.) ледниково-озерный бассейн сменился ледниково-морским, в котором происходила циклическая седиментация, связанная с отступающим краем ледника. Характерной чертой его является наличие многочисленных гряд – краевых форм ледникового рельефа, положение которых отражает различные

Таблица 1. Биостратиграфические зоны, растительность и возраст отложений по результатам изучения Онежского и Ладожского озер
Table 1. Biostratigraphic zones, vegetation and sediment age based on the result of Onega and Ladoga Lakes studies

Хронозоны	Биостратиграфические зоны		Растительность		^{14}C возраст, тыс. кал. л. н.
	Онежское озеро (ONG2, ONG5), неопубликованные данные	Ладожское озеро (Co1309, Savelieva et al., 2019)	Онежское озеро (ONG2, ONG5), неопубликованные данные	Ладожское озеро (Co1309, Savelieva et al., 2019)	Ладожское озеро (Co1309, Savelieva et al., 2019)
AL	*Betula nana-Artemisia*-Cyperaceae 25–50%	*Artemisia*-Poaceae-*Pinus-Picea* 25–65% трав	Тундровая и лесотундровая с преобладанием ерниковых сообществ	Лесотундровая с участием сосны, березы и ели	13.1 12.6
YD	*Artemisia*-Cyperaceae-Chenopodiaceae-*Betula nana* 45–70% трав	*Artemisia*-Poaceae-Chenopodiaceae-*Betula nana* 35–85% трав	Тундровая с участием перигляциальной флоры и преобладанием ксерофитных сообществ	Тундровая с участием перигляциальной флоры и преобладанием ксерофитных сообществ	11.2
PB-1	*Betula nana*-Cyperaceae 30–50% трав	*Betula nana-Pinus-Salix*-Cyperaceae 20–30% трав	Тундровая и лесотундровая	Лесотундровая с участием березы, ивы и сосны	9.0
PB-2	*Betula nana*-Betula sect. Albae-*Artemisia* 25–35% трав		Лесотундровая с участием ксерофитов		
BO	–	*Pinus*	–	Сосновые леса	8.0
AT-1	*Pinus-Picea-Alnus-Ulmus-Quercus*	*Pinus-Alnus-Corylus-Ulmus*	Еловые и сосновые леса с участием ольхи, вяза, дуба	Сосновые леса с участием ольхи, вяза, лещины	7.2
AT-2		*Pinus-Alnus-Picea-Ulmus-Quercus*		Сосновые леса с елью, ольхой и широколиственными породами	5.6
SB	*Picea-Pinus-Alnus*	*Picea-Pinus-Alnus-Quercus*	Еловые и елово-сосновые леса с участием ольхи	Сосново-еловые леса с участием ольхи, березы и дуба	2.2
SA	*Pinus-Betula*-Poaceae	*Pinus-Alnus*	Сосновые и березовые леса с ольхой, ивой и елью	Сосновые леса с березой, ольхой, ивой и елью	
		Pinus-Alnus-Cerealia		Сосновые леса с березой и ольхой, травянистый покров с участием растений антропохоров	

стадии отступания покровного ледника из беломорской впадины (Рыбалко и др., 2017б).

Характерно, что как Белое, так и Балтийское моря в начале своего развития прошли стадию приледниковых бассейнов (Рыбалко, 1999; Рыбалко и др., 2022), Так, исследования озер по берегам Кольского п-ова и Карелии (Колька и др., 2013) показали, что впервые приледниковый пресноводный бассейн возник в Беломорской депрессии в аллереде. Но уже в конце этого межста-

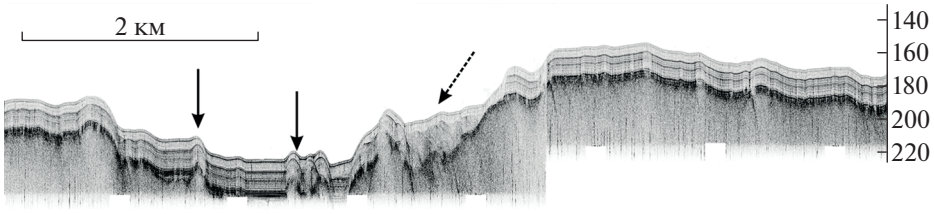


Рис. 5. Смещение слоев ленточных глин в результате геодинамических движений (сплошные стрелки) и потеря зон корреляции слоев в результате оползания блоков четвертичных отложений (пунктирная стрелка). Ладожское озеро (Материалы ФГУНПП "Севморгео").

Fig. 5. Varved clays faulting as a result of geodynamics (black arrows) and zones of uncorrelation as a result of quaternary sediments sliding (dashed arrow). Ladoga Lake (materials of "Sevmorgeo").

диала, в ходе позднеледниковой морской трансгрессии в него начали поступать морские воды, так как уровень порога стока в Горле Белого моря находился тогда ниже уровня моря. По крайней мере, в конце позднего дриаса–начале пребореала морские условия в беломорской котловине уже присутствовали, так как на Кольском побережье установлены морские отложения с возрастом $11\,230 \pm 340$ ^{14}C л. н. (Рыбалко и др., 2017а). Данные же по изучению затопленных ледниковых и ледниково-озерных отложений в Белом море, свидетельствуют, что в Онежском заливе приледниковые бассейны существовали уже в раннем дриасе (Джиноридзе и др., 1979).

Таким образом, мы видим, что многие закономерности, рассмотренные нами на примере двух крупнейших озер Европы, присущи и внутренним морским бассейнам. Котловины их также были заложены в архей-протерозое. Пути развития морских и озерных бассейнов разошлись, преимущественно, в среднем и даже позднем голоцене (Рыбалко, 1999).

Существенный вклад в развитие палеобассейнов по восточной периферии Балтийского кристаллического щита внесли послеледниковые геодинамические движения. Послеледниковый их возраст доказывается резкими очертаниями скального рельефа или береговых линий, что отчетливо отличается от сглаженных форм рельефа дочетвертичного возраста, возникших в результате экзарации их ледником. Так, отчетливые следы палеоземлетрясений в период 12000–12500 л. н. встречены во всех основных частях Беломорского бассейна – в Кандалакшском, Двинском и Онежском заливах, а также в районе Горла Белого моря (Рыбалко и др., 2017). Подобные тектоногенные формы рельефа, выражающиеся в формировании протяженных уступов, как в береговой линии, так и под водой были установлены в Ладожском озере (Амантов, Спиридонов, 1989; Aksenov et al., 2020). Наши работы показали, что как в Онежском, так и в Ладожском озерах выделяются многочисленные прямолинейные формы рельефа, особенно в их северной частях, которые могут быть сопоставлены с активизированными в четвертичное, в том числе и в голоценовое время, разломами. Это приводит к нарушению сплошности горизонтов ленточных глин, а также к появлению сейсмогравитационных подсклоновых отложений, возникающих при оползании или оплывании донных отложений (рис. 5).

Триггером гравитационного перемещения грунтов выступают обычно слабые сейсмотолчки. Убедительные доказательства о сейсмогенной природе некоторых форм донного рельефа в Ладожском озере приведены ранее (Subetto et al., 1998) и в последние годы Б.А. Ассиновской и С.Б Николаевой (Ассиновская, 2020; Николаева, Евзеров, 2018).

В последние годы появились серьезные работы по обобщению сейсмогеологических работ в Карелии, в том числе в Ладожском и Онежском озерах. Так, рассмотрение сейсмичности рассматриваемых территорий на основе изучения активных разломов позволило А.А. Никонову и С.В. Шварева (Никонов, Шварев, 2015) прийти к выводу, что морфология берегов рассматриваемых озер во многом зависит от деятельности активизированных в четвертичное время сейсмолинеаментов, а максимальная магнитуда сейсмотолчков за последние 12000–13000 лет могла достигать 7 баллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше данные, основанные как на анализе четвертичного покрова и геоморфологии озерного дна, так и на материалах изучения наземных объектов показывают, что заложение котловин обоих озер, а также внутренних морских бассейнов происходило главным образом в позднем протерозое, на переходной стадии между завершением протерозойской складчатости и началом формирования плитного чехла. Важно подчеркнуть, что дизъюнктивная тектоника, во многом определившая как очертания Ладожского грабена, так и своеобразную морфологию северной части Онежского озера, сохранила свою активность

и в четвертичное время. Именно поэтому контуры древних структурных депрессий достаточно близко совпадают с очертаниями современных ладожской и онежской котловин. Видимо, начальным этапом активизации неотектонических процессов на Русской плите, в том числе и на Балтийском кристаллическом щите, был плиоцен, с которым связывается образование разветвленной сети палеодолин на Русской равнине. Сам Балтийский щит, в том числе территория современной Карелии, сохранили в постплиоценовое время режим сводового поднятия. На фоне этого происходила активизация ранее заложенных линеаментов и именно ослабленные зоны, расположенные между линеаментами, и использовались ледниками для продвижения передовых языков на юг и юго-восток. Максимум экзарации, при этом, происходил на контакте твердых пород кристаллического щита и мягких пород Русской плиты, что и привело к формированию уже четвертичных котловин в зонах развития древних структурных депрессий. Сам ледниковый щит приводил к гляциоизостатическим опусканиям территории, что, в свою очередь, приводило к растрескиванию кристаллических пород. Тренд напряжений в верхнем неоплейстоцене – голоцене имел преимущественно северо-западное простирание, что и привело к появлению генерального направления гляциогенных структур как на суше (ориентировка, например, друмлиновых полей), так и на дне озер (северо-западная ориентировка вытянутых положительных структур).

Ледниковый этап формирования озер имел решающее значение в оформлении морфологии самих озерных котловин и в формировании на их дне макро- и мезоформ рельефа. К первым относится образование структурно-ледникового рельефа на севере Ладожского озера, ко вторым – пояса гряд на Ладожском (Aksenov et al., 2020) и Онежском (Беляев и др., 2021) озерах. Как уже отмечалось выше, ледник способствовал формированию экзарационных, главным образом, отрицательных форм рельефа, в том числе, формированию бухтовых берегов в южной части озер. Но, не в меньшей мере, мы находим огромное количество аккумулятивных форм, сформированных как в активную фазу движения ледников, так и в период их деградации и возникновения флювиогляциальных потоков. Последующий этап развития дегляциации, а именно формирование приледниковых озер и сопутствующее ему накопление ленточных глин приводили к выравниванию рельефа, а его перекос в результате гляциоизостатических движений приводил к трансгрессивно-регрессивным перемещениям водного зеркала и изменению аккумулятивно-денудационных процессов уже в водной толще.

Описанный ход развития, судя по приведенным выше данным, характерен как для обоих озер, так и морских внутренних морей (Балтийского и Белого). Он соответствует ранее описанному гляциоседиментационному циклу (Рыбалко, 1999), характерному для озер и морей гляциальной зоны. А вот конкретный возраст каждого из членов этого цикла в конкретном водном бассейне и находящий свое отражение как в донных осадках, так и в специфических формах донного рельефа, различен в обоих озерах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья написана при содействии Российского научного фонда (гранты № 18-17-00176П и № 22-17-00081) и при финансовой поддержке Минпросвещения России в рамках государственного задания (№ проекта VRFY-2023-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксенов А.О., Рыбалко А.Е., Науменко М.А. (2020). Картирование подводного рельефа Ладожского озера // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 7. СПб.: ААНИИ. С. 259–262.

Алешин М.И., Видищева О.Н., Валиева Э.И. и др. (2021а). Четвертичные отложения открытой части Онежского озера и Заонежского залива // Геофизические исследования. Т. 22. № 3. С. 35–52. https://doi.org/10.21455/gr2021.3-3

Алешин М.И., Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю. и др. (2019). Изучение придонных осадков в Петрозаводской губе Онежского озера с помощью комплексирования геолого-геофизических методов изучения донных отложений // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. № 4. С. 98–104. https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-4-98-104

Алешин М.И., Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю. и др. (2021б). Результаты комплексирования геолого-геофизических методов с целью определения структуры и свойств осадков Петрозаводской губы Онежского озера // Геофизика. Спецвыпуск. С. 330–340.

Амантов А.В., Амантова М.Г. (2014). Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Региональная геология и металлогения. № 59. С. 5–14.

Амантов А.В., Спиридонов М.А. (1989). Геология Ладожского озера // Советская геология. № 4. С. 83–86.

Ассиновская Б.А., Карпинский В.В. (2020). Ладожские сейсмические события. СПБ: ВСЕГЕИ. 46 с.

Балуев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н. и др. (2012). Тектоника Белого моря и прилегающих территорий: Объяснительная записка к “Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий” масштаба 1: 150000 // Труды ГИН. № 597. 104 с.

Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А. и др. (2021). Четвертичные отложения и рельеф Онежского озера // Геогр. вестник. Т. 56. № 1. С. 6–16. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-6-16

Демидов И.Н. (2004). Донные отложения и колебания уровня Онежского озера в позднеледниковье //

Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. С. 208–218.

Джиноридзе Р.Н., Кириенко Е.А., Калугина Л.В. и др. (1979). Стратиграфия верхнечетвертичных отложений северной части Белого моря // Позднечетвертичная история и седиментогенез окраинных и внутренних морей. М.: Наука. С. 34–39.

Знаменская О.М., Черемисинова Е.А. (1962). Распространение Мгинского межледникового моря и основные черты его палеогеографии // Вопросы стратиграфии четвертичных отложений Северо-Запада Европейской части СССР. Л.: Гостоптехиздат. С. 140–160.

Квасов Д.Д. (1976). Происхождение котловины Онежского озера // Палеолимнология Онежского озера. Л.: Наука. С. 7–40.

Колька В.В., Евзеров В.Я., Меллер Я.Й. и др. (2013). Перемещение уровня моря в позднем плейстоцене-голоцене и стратиграфия донных осадков изолированных озер на южном берегу Кольского полуострова, в районе поселка Умба // Известия РАН. Сер. географическая. № 1. С. 73–88. https://doi.org/10.15356/0373-2444-2013-1-73-88

Лаврова Н.Б. (2005). Развитие растительности бассейна Онежского озера в ходе деградации последнего оледенения // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. С. 143–148.

Максимов А.В., Богданов Ю.Б., Войнова О.А. и др. (2015). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист P-(35),36. Петрозаводск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 400 с.

Николаева С.Б., Евзеров В.Я. (2018). К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: обзор и результаты исследований // Вестник ВГУ. Серия: Геология. № 1. С. 5–14. https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1386

Никонов А.А., Шварев С.В. (2015). Сейсмолинеаменты и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет // Мат-лы Междунар. конф. “Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности”. Нерюнгри: СВФУ. С. 243–251.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения). (2011) / Под ред. Л.В. Глушанина, Н.В. Шарова, В.В. Щипцова. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 431 с.

Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. (2022) / Отв. ред. Д.А. Субетто. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 333 с.

Рыбалко А.Е. (1998). История развития водных геосистем периферии Балтийского кристаллического щита в позднем плейстоцене-голоцене // Всерос. совещ. “Главнейшие итоги в изучении четвертичного периода и основные направления исследований в XXI веке”. СПб: ВСЕГЕИ. С. 145–146.

Рыбалко А.Е. (1999). Позднечетвертичный седиментогенез внутренних морей гляциальных шельфов Северо-Запада России. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. СПб: ВСЕГЕИ. 48 с.

Рыбалко А.Е., Журавлев В.А., Семенова Л.Р. и др. (2017а). 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. С. 16–84.

Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Репкина Т.Ю. и др. (2022). Основные этапы изучения геологии четвертичных отложений Белого моря и дискуссионные проблемы его палеогеографии в позднем неоплейстоцене–голоцене // Известия РАН. Сер. географическая. Т. 86. № 6. С. 848–869. https://doi.org/10.31857/S2587556622060152

Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Токарев М.Ю. (2015). Морской и озерный этапы развития Великих озер Европы (по данным сейсмоакустических исследований) // Геология морей и океанов / Мат-лы XXI Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ГЕОС. С. 310–313.

Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Токарев М.Ю. и др. (2019а). Палеогеография озерных и морских бассейнов восточной периферии Балтийского кристаллического щита в позднем неоплейстоцене и голоцене – итоги работ по программе в 2019 году // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 6. СПб: ААНИИ. С. 242–249. https://doi.org/10.24411/2687-1092-2019-10635

Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Федоров Г.Б. и др. (2020а). Первый опыт инженерно-геологического бурения в Онежском озере // Труды VIII Междунар. науч.-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)”. Т. II. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”. С. 94–97.

Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Корост Д.В. (2017б). Новые данные о строении Онежского озера по данным геолого-геофизических исследований в 2016–2017 гг. // Труды VI Междунар. науч.-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU-2017)”. Т. II. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”. С. 254–257.

Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А. и др. (2020б). 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. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”. С. 400–404.

Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А. и др. (2019б). Новые данные о четвертичных отложениях Онежского озера по результатам работ 2016–2018 гг. // Труды VII Междунар. науч.-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)”. Т. II. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”. С. 93–101.

Субетто Д.А. (2009). Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена. 339 с.

Шалаева Н.В., Старовойтов А.В. (2010). Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях. М.: Изд-во Моск. ун-та. 256 с.

Aksenov A.O., Rybalko A.E., Naumenko M.A. (2020). Geomorphology of Lake Ladoga basin // Limnology and

Freshwater Biology. № 4. P. 492–494. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-492

Andreev A.A., Shumilovskikh L.S., Savelieva L.A. et al. (2019). Environmental conditions in northwestern Russia during MIS 5 inferred from the pollen stratigraphy in a sediment core from Lake Ladoga // Boreas. Vol. 48. Iss. 2. P. 377–386. https://doi.org/10.1111/bor.12382

Gromig R., Wagner B., Wennrich V. et al. (2019). Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments // Boreas. Vol. 48. Iss. 2. P. 330–348. https://doi.org/10.1111/bor.12379

Hang T., Gurbich V., Subetto D. et al. (2010). A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia // Quat. Int. Vol. 524. P. 13–23. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.021

Lebas E., Gromig R., Krastel S. et al. (2021). Pre-glacial and post-glacial history of the Scandinavian Ice Sheet in NW Russia – Evidence from Lake Ladoga // Quat. Sci. Rev. Vol. 251. No. 2. P. 106637. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106637

Ludikova A.V., Subetto D.A., Andreev A.A. et al. (2021). The first dated preglacial diatom record in Lake Ladoga: long-term marine influence or redeposition story? // J. Paleolimnol. Vol. 65. No. 1. P. 85–99. https://doi.org/10.1007/s10933-020-00150-0

Rybalko A.E., Subetto D.A., Tokarev M.Yu. et al. (2020). Lithoseismostratigraphy and features of the paleogeographic development of Lake Onega and the White Sea in the Late Pleistocene and Holocene // Limnology and Freshwater Biology. No. 4. P. 524–526. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-524

Saarnisto M., Saarinen T. (2001). Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega Basin to the Salpausselka End Moraines // Global and Planetary Change. Vol. 31. P. 387–405. https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00131-X

Savelieva L.A., Andreev A.A., Gromig R. et al. (2019). Vegetation and climate changes in northwestern Russia during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record // Boreas. Vol. 48. Iss. 2. P. 349–360. https://doi.org/10.1111/bor.12376

Savelieva L.A., Rybalko A.E., Kiskina A.R. et al. (2018). Response of vegetation to climate changes during late glacial and Holocene inferred from pollen record of Lake Onega // Paleolimnology of Northern Eurasia: experience, methodology, current status and young scientists school in microscopy skills in paleolimnology: proceedings of the 3rd International Conference. Kazan: Publishing House of Kazan University. P. 105–106.

Subetto D.A., Davydova N.N., Rybalko A.E. (1998). Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. Vol. 140. P. 113–119. https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00032-7

Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V. et al. (2020). Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia) // Minerals. Vol. 10. No. 11. P. 964. https://doi.org/10.3390/min10110964

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D. et al. (2019). Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations // J. of Paleolimnol. Vol. 62. No. 1. P. 53–71. https://doi.org/10.1007/s10933-019-00075-3

FORMATION OF THE LARGEST LAKES IN THE NORTH-EASTERN EUROPE AT THE EASTERN PERIPHERY OF THE BALTIC CRYSTALLINE SHIELD[1]

A. E. Rybalko[a,b,f,#], D. A. Subetto[c], N. A. Belkina[d], V. D. Strakhovenko[e], A. O. Aksenov[b,h], P. Yu. Belyaev[f], M. Yu. Tokarev[g], L. A. Savelyeva[b], M. S. Potakhin[d], A. V. Orlov[c,d], S. R. Korost[a,g], Yu. A. Kublitsky[c], and A. S. Loktev[f]

[a] *Marine Research Center of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[b] *Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*
[c] *Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia*
[d] *Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*
[e] *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*
[f] *FSBI "VNIIOkeangeologia", St. Petersburg, Russia*
[g] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia*
[h] *FSBI "Arctic and Antarctic Research Institute", St. Petersburg, Russia*
[#] *E-mail: alek-rybalko@yandex.ru*

Since 2014, the joint research team from the Institute of Earth Sciences, Northern Water Problems Institute KRC RAS, the Science Park of Moscow State University, as well as FSBI "VNIIOkeangeologia", and Herzen State Pedagogical University of Russia has begun a study of Quaternary deposits of Onega and Ladoga Lakes, the largest Russian lakes located on the eastern periphery of the Baltic crystalline shield. Using large volume of data collected in previous studies, and new data obtained by multichannel seismoacoustic profiling

[1] *For citation:* Rybalko A.E., Subetto D.A., Belkina N.A. et al. (2023). Formation of the largest lakes in the North-Eastern Europe at the eastern periphery of the Baltic Crystalline Shield. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 4. P. 40–56. (in Russ.). https://doi.org/10.31857/S2949178923040102; https://elibrary.ru/GDUAQA

and heavy gravity corers, as well as new methods for core analysis the main attention was paid to the geological development of these lakes in the Late Pleistocene-Holocene. The study of the lake Quaternary deposits makes it possible to accurately understand the dynamics of the Scandinavian Ice Shield retreat from the North-Western territory of the Russian Federation. At the same time, the major influence of the glaciers on the lakes formation during its degradation makes it possible to draw regional paleogeographic correlations, starting from the Baltic and ending with the White Sea. The history of the lake basins formation is also of considerable interest, given that there are practically no Phanerozoic deposits. The geological section of the lakes is represented by both Archean-Proterozoic and Quaternary formations.
The article discusses the analysis of new data obtained using multichannel seismoacoustic profiling and long sediment cores (Lake Onega), results of mathematical modeling of cycles of lake basins development (glacial, glacial-lake, lacustrine), and their correlation with the paleogeographic development of the White Sea.

Keywords: Lake Onega, Lake Ladoga, seismoacoustic profiling of freshwater basins, Quaternary deposits, the Upper Pleistocene and Holocene, bottom sediments of lakes, drilling, paleolimnology, palaeogeography

ACKNOWLLEDGMENTS

The article was written with the assistance of the Russian Science Foundation, grants No. 18-17-00176P and No. 22-17-00081 and with the financial support of the Ministry of Education of Russia within the framework of the state task (project No. VRFY-2023-0010).

REFERENCES

Aksenov A.O., Rybalko A.E. Naumenko M.A. (2020). Geomorphology of Lake Ladoga basin. *Limnology and Freshwater Biology*. No. 4. P. 492–494. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-492

Aksenov A.O., Rybalko A.E., Naumenko M.A. (2020). Mapping of Lake Ladoga subaqual surface. *Relief i chetvertichnye obrazovania Arctiki, SubArctiki i severo-zapada Rossii*. *Vol. 7.* Saint-Petersburg: AANII (Publ.). P. 3–10. (in Russ.)

Aleshin M.I., Gaynanov V.G., Tokarev M.Yu. et al. (2019). Study of Onega Lake Petrozavodsk Bay sub-bottom sediments using complex geophysical and geological data analysis. *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 4. Geologia*. No. 4. P. 98–104. (in Russ.). https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-4-98-104

Aleshin M.I., Rybalko A.E., Tokarev M.Yu. et al. (2021б). Results of combining geological and geophysical methods to define structure and features of Petrozavodsk Bay (Onega Lake) deposits. *Geofizika*. *Special Issue*. P. 330–340. (in Russ.)

Aleshin M.I., Vidischeva O.N., Valieva E.I. et al. (2021a). Quaternary sediments of the open part of lake Onega and the Zaonezhsky Bay. *Geofizicheskie issledovaniya*. No. 3. P. 35–52. (in Russ.). https://doi.org/10.21455/gr2021.3-3

Amantov A.V., Amantova M.G. (2014). Lake Ladoga basin development with implications of aspects of the glacial theory. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. No. 59. P. 5–14. (in Russ.)

Amantov A.V., Spiridonov M.A. (1989). Lake Ladoga geology. *Sovetskaya Geologiya*. No. 4. P. 83–86. (in Russ.)

Andreev A.A., Shumilovskikh L.S., Savelieva L.A. et al. (2019). Environmental conditions in northwestern Russia during MIS 5 inferred from the pollen stratigraphy in a sediment core from Lake Ladoga. *Boreas*. Vol. 48. Iss. 2. P. 377–386. https://doi.org/10.1111/bor.12382

Assinovskaya B.A., Karpinskiy V.V. (2020). Ladozhskie seismicheskie yavleniya (Ladoga seismic phenomena). SPB: VSEGEI (Publ.). 54 p. (in Russ.)

Baluev A.S., Zhuravlev V.A., Terekhov E.N. et al. (2012). Tectonics of the White Sea and adjacent areas (The explanation notes to "The Tectonic Map of the White Sea and Adjacent Areas", scale of 1:1500 000). *Trudy GIN*. No. 597. P. 1–104. (in Russ.)

Belyaev P.Yu., Rybalko A.E., Subetto D.A. et al. (2021). Quaternary deposits and geomorphological features of lake Onega. *Geogr. Vestnik*. Iss. 56. No. 1. P 6–16. (in Russ.). https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-6-16

Demidov I.N. (2004). Onega Lake bottom sediments and level fluctuations in the Late Glacial. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii*. Vol. 7. P. 208–218. (in Russ.)

Dzhinoridze R.N., Kirienko E.A., Kalugina L.V. et al. (1979). Stratigraphy of the northern White Sea Upper Quaternary deposits. *Pozdnechetvertichnaya istoriya i sedimentogenez okrainnykh i vnutrennikh morei*. Moscow: Nauka (Publ.). P. 34–39. (in Russ.)

Glushanin L.V., Sharov N.V., Schiptsov V.V. (Eds.). (2011). Onezhskaya paleoproterozoiskaya struktura (geologiya, tektonika, glubinnoe stroenie i mineralogeniya) (The Palaeoproterozoic Onega structure (geology, tectonics, deep structure and mineralogeny)). Petrozavodsk: KarNC RAN (Publ.). 431 p. (in Russ.)

Gromig R., Wagner B., Wennrich V. et al. (2019). Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments. *Boreas*. Vol. 48. Iss. 2. P. 330–348. https://doi.org/10.1111/bor.12379

Hang T., Gurbich V., Subetto D. et al. (2010). A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia. *Quat. Int.* Vol. 524. P. 13–23. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.021

Kolka V.V., Yevzerov V.Ya., Møller J.J. et al. (2013). The Late Weichselian and Holocene relative sea-level change and isolation basin stratigraphy at the Umba settlement, southern coast of Kola Peninsula. *Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya*. No. 1. P. 73–88. (in Russ.). https://doi.org/10.15356/0373-2444-2013-1-73-88

Kvasov D.D. (1976). Origin of Onega Lake depression. *Paleolimnologiya Onezhskogo ozera*. Leningrad: Nauka (Publ.). P. 7–40. (in Russ.)

Lavrova N.B. (2005). Distribution of Onega Lake basin vegetation during the last glacial degradation. *Geologiya*

i poleznye iskopaemye Karelii. Vol. 8. P. 143–148. (in Russ.)

Lebas E., Gromig R., Krastel S. et al. (2021). Pre-glacial and post-glacial history of the Scandinavian Ice Sheet in NW Russia – Evidence from Lake Ladoga. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 251. No. 2. P. 106637. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106637

Ludikova A.V., Subetto D.A., Andreev A.A. et al. (2021). The first dated preglacial diatom record in Lake Ladoga: long-term marine influence or redeposition story? *J. Paleolimnol.* Vol. 65. No. 1. P. 85–99. https://doi.org/10.1007/s10933-020-00150-0

Maksimov A.V. Bogdanov Ju.B., Vojnova O.A. et al. (2015). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1: 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Baltiiskaya. List P-(35), 36. Petrozavodsk. Obyasnitel'naya zapiska (State geological map of Russian Federation. Scale 1: 1 000 000 (third generation). Baltic series. Plot P-36. Petrozavodsk. Explanation note). Saint-Petersburg: Kartograficheskaja fabrika VSEGEI (Publ.). 400 p. (in Russ.)

Nikolaeva S.B., Evzerov V.Ya. (2018). On geodynamics of the Kola region in the Late Pleistocene and Holocene: a review and studies results. *Vest. VGU. Seria: Geologia*. No 1. P. 5–14. (in Russ.)

Nikonov A.A., Shvarev S.V. (2015). Seismogenic lineaments and destructive earthquakes in the Russian part of the Baltic shield: new approach for long-time evaluations (134 000 years). *Mat-ly Mezhdunar. konf. "Geologo-geofizicheskaya sreda i raznoobraznye proyavlenii aseismichnosti"*. Nerjungri: SVFU (Publ.). P. 243–251. (in Russ.)

Rybalko A.E. (1998). Development history of the Baltic Shield periphery water geosystems at the late Pleistocene-Holocene. *Vseros. sovesh. "Glavneishie itogi v izuchenii chetvertichnogo perioda i osnovnye napravleniya issledovanii v XXI veke"*. Saint-Petersburg: VSEGEI (Publ.). P. 145–146. (in Russ.)

Rybalko A.E. (1999). Pozdnechetvertichnyi sedimentogenez vnutrennikh morei glyatsial'nykh shel'fov Severo-Zapada Rossii (The Late Quaternary sedimentogenesis of inland seas at the glacial shelf of the Russian North-West). PhD thesis. Saint-Petersburg: VSEGEI (Publ.). 48 p. (in Russ.)

Rybalko A.E., Shzuravlev V.A., Semenova L.R. et al. (2017). The Quaternary deposits of the White Sea and evolution history of the modern White Sea basin at the Pleistocene-Holocene. *Sistema Belogo morya. Vol. IV. Processy osadkoobrazovaniya, geologiya i istoriya*. Moscow: Nauchnyi mir (Publ.). P. 16–84. (in Russ.)

Rybalko A.E., Subetto D.A., Fedorov G.B. et al. (2020). First experience of geologic coring at Onega Lake. *Trudy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2019)"*. Iss. 2. Tver': PoliPRESS (Publ.). P. 94–97. (in Russ.)

Rybalko A.E., Subetto D.A., Repkina T.Yu. et al. (2022). The main stages in the studying Quaternary Deposits of the White Sea and controversial Problems of its Late Pleistocene and Holocene paleogeography. *Izvestiya RAN. Ser. Geograficheskaya*. Vol. 86. No. 6. P. 848–869. (in Russ.) https://doi.org/10.31857/S2587556622060152

Rybalko A.E., Subetto D.A., Tokarev M.Yu. (2015). Marine and lacustrine development stages of the Great European Lakes (obtained with seismoacoustic surveys). *Geologiya morei i okeanov: Mat-ly XXI Mezhdunar. nauch. konf. (Shkoly) po morskoi geologii*. Iss. IV. Moscow: GEOS (Publ.). P. 310–313. (in Russ.)

Rybalko A.E., Subetto D.A., Tokarev M.Yu. et al. (2019). Paleogeography of lakes and marine basins of the Eastern periphery of the Baltic crystal shield in Late Pleistocene and Holocene – results of the investigation on program in 2019. *Relief i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii. Vol. 6*. Saint-Petersburg: AARI (Publ.). P. 242–249. (in Russ.) https://doi.org/10.24411/2687-1092-2019-10635

Rybalko A.E., Subetto D.A., Tokarev M.Yu. et al. (2020). Lithoseismostratigraphy and features of the paleogeographic development of Lake Onega and the White Sea in the Late Pleistocene and Holocene. *Limnology and Freshwater Biology*. No. 4. P. 524–526. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-524

Rybalko A.E., Tokarev M.Yu., Korost D.V. (2017). New data on Onega Lake deposits according to geological-geophysical studies on 2016–2017. *Trudy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2017)"*. Vol. 2. Tver: PoliPRESS (Publ.). P. 254–257. (in Russ.)

Rybalko A.E. Tokarev M.Yu., Subetto D.A. et al. (2019). New data on the Quaternary deposits of Onega Lake according to results of 2016–2018 fieldwork. *Trudy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2018)"*. Iss. 2. Tver': PoliPRESS (Publ.). P. 93–101. (in Russ.)

Rybalko A.E., Tokarev M.Yu., Subetto D.A. et al. (2020). Map of quaternary deposits of the Onega Lake: result of the complex geological-geophysical studies on 2016–2019. *Trudy IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2020)"*. Iss. 3. Tver': PoliPRESS (Publ.). P. 400–404. (in Russ.)

Saarnisto M., Saarinen T. (2001). Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the Lake Onega Basin to the Salpausselka End Moraines. *Global and Planetary Change*. Vol. 31. P. 387–405. https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00131-X

Savelieva L.A., Andreev A.A., Gromig R. et al. (2019). Vegetation and climate changes in northwestern Russia during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record. *Boreas*. Vol. 48. Iss. 2. P. 349–360. https://doi.org/10.1111/bor.12376

Savelieva L.A., Rybalko A.E., Kiskina A.R. et al. (2018). Response of vegetation to climate changes during late glacial and Holocene inferred from pollen record of Lake Onega. *Paleolimnology of Northern Eurasia: experience, methodology, current status and young scientists school in microscopy skills in paleolimnology: proceedings of the 3rd International Conference*. Kazan': Publishing House of Kazan University (Publ.). P. 105–106.

Shalaeva N.V., Starovojjtov A.V. (2010). Osnovy seismoakustiki na melkovodnykh akvatoriyakh (Seismoacoustic basics at the shallow water basins). Moscow: MGU (Publ.). 256 p.

Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V. et al. (2020). Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia).

Minerals. Vol. 10. No. 11. P. 964. https://doi.org/10.3390/min10110964

Subetto D.A. (2009). Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii (Lake bottom sediments: paleolimnological reconstructions). Saint-Petersburg: RGPU im. A.I. Gertsena (Publ.). 343 p. (in Russ.)

Subetto D.A. (Ed.). (2022). Paleolimnologiya Onezhskogo ozera: ot prilednikovogo ozera k sovremennym usloviyam (Paleolimnology of Lake Onego: from the Onego Ice Lake to the present state). Petrozavodsk: KarNCRAN (Publ.). 333 p. (in Russ.)

Subetto D.A., Davydova N.N., Rybalko A.E. (1998). Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* Vol. 140. P. 113–119. https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00032-7

Znamenskaya O.M., Cheremisinova E.A. (1962). The Mga interglacial sea distribution and the main features of its paleogeography. *Voprosy stratigrafii chetvertichnykh otlozhenii Severo-Zapada Evropeiskoi chasti SSSR*. Leningrad: Gostoptekhizdat (Publ.). P. 140–160.

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D. et al. (2019). Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations. *J. of Paleolimnol.* Vol. 62. No. 1. P. 53–71. https://doi.org/10.1007/s10933-019-00075-3