

*На правах рукописи*

Беляев Павел Юрьевич

Рельеф дна и строение поздневалдайских-голоценовых отложений котловин Ладожского и  
Онежского озёр

1.6.14 – Геоморфология и палеогеография

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
географических наук

Москва 2021

Работа выполнена в отделе региональной геологии и полезных ископаемых Западных районов Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского.

Научный  
руководитель:

Рыбалко Александр Евменьевич, д. г.-м. н.,  
ведущий научный сотрудник ФГБУ «ВНИИОкеангеология им. И.С.  
Грамберга»;  
профессор кафедры геоморфологии Института наук о земле Санкт-  
Петербургского государственного университета

Официальные  
оппоненты:

Назаров Николай Николаевич, д. г. н, профессор, заведующий  
кафедрой физической географии и ландшафтной экологии Пермского  
государственного национального исследовательского университета

Репкина Татьяна Юрьевна, к. г. н.,  
старший научный сотрудник  
кафедры геоморфологии и  
палеогеографии географического факультета Московского  
государственного университета

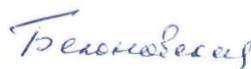
Ведущая организация:

Институт озераедения Российской академии наук

Защита состоится «26» ноября 2021 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 24.1.049.02. на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. Отзывы на автореферат (в электронном виде и на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью) просим направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный пер, д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета Д 24.1.049.02, Белоновской Е. А. Факс 8(495)959-00-16 e-mail: [d00204603@igras.ru](mailto:d00204603@igras.ru)

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук



Е. А. Белоновская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Ладожское и Онежское озёра – крупнейшие пресноводные водоёмы Европы. Озёра являются значимыми источниками геологической и палеогеографической информации. Учитывая, что изучаемые озёра занимают обширные площади, изучение четвертичных отложений этих озёр, где их мощность и непрерывность существенно больше, чем в береговых разрезах, представляет большой интерес для четвертичной геологии северо-запада России и истории его развития в позднем неоплейстоцене-голоцене. Это тем более важно, так как последние значимые работы с использованием тяжёлых грунтовых трубок в этих озёрах проводились в конце прошлого века (Saarnisto, Saarinen, 2001; Макарьев, 2002; Субетто, 2009).

Диссертация написана по результатам полевых исследований, проводившихся, начиная с 2014 года при участии специалистов МГУ, СПбГУ, ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева, ИВПС Кар НЦ РАН и ряда других организаций. Работы велись с использованием новейшего геофизического и пробоотборного оборудования, позволившего получить новые данные, существенно расширяющие наши знания о строении четвертичного покрова и рельефа озерного дна, а также получить дополнительный материал о палеогеографическом развитии этих озёр на рубеже неоплейстоцена и голоцена.

**Актуальность работы** обусловлена недостаточной изученностью геолого-геоморфологических особенностей строения котловин Ладожского и Онежского озёр - стратегически важных природных объектов для водопользования и водопотребления на Северо-западе России. Так, все еще недостаточно исследована литостратиграфия верхнечетвертичных отложений, до недавнего времени почти отсутствовали картографические материалы, основанные на результатах обработки данных высокоразрешающих сейсмоакустических исследований и тяжёлого геологического пробоотбора. То же относится и к геоморфологическим картам. Задачи геолого-геоморфологического изучения котловин Ладожского и Онежского озёр корреспондируются с Указом Президента РФ от 7 мая 2018 г., суть которого изложена в обращении к Совету безопасности РФ (ссылка: <https://www.newsru.com/russia/20nov2013/sovbez.html>) и предусматривает проведение геологических исследований для более детального изучения четвертичных отложений. В ходе выполнения диссертационного исследования были получены новые данные, существенно расширяющие знания о строении четвертичного покрова и рельефа озерного дна Ладожского и Онежского озёр, а также позволяющие получить новую информацию о развитии этих озёр в позднем неоплейстоцене и голоцене.

**Цель исследования** - Описание особенностей формирования рельефа и отложений котловин Ладожского и Онежского озёр в период с заключительной части валдайского оледенения по голоцен.

**Задачи**, поставленные для достижения указанной цели:

- 1) Актуализация стратиграфической привязки поздневалдайских-голоценовых отложений Ладожского и Онежского озёр на основе обработки новых полученных геолого-геофизических материалов.
- 2) Анализ данных о возрасте, морфологии и генезисе рельефа котловин Ладожского и Онежского озёр на основе интерпретации новых данных сейсмоакустического профилирования.
- 3) Выделение этапов гляциоседиментационного цикла в котловинах Ладожского и Онежского озёр.
- 4) Сравнительная характеристика развития отложений и рельефа Ладожского и Онежского озёр с поздневалдайского периода по голоцен на основе сопоставления выделенных этапов гляциоседиментационного цикла.

**Объект исследования:** котловины Ладожского и Онежского озёр.

**Предмет исследования:** строение и геоморфологические особенности котловин Ладожского и Онежского озёр.

**Методы исследований:** Работа написана по результатам полевых работ, проводимых с

2014 по 2019 гг. в пределах акваторий Ладожского и Онежского озера. Работы включали в себя геологический пробоотбор и геофизические исследования.

Геофизические работы были представлены многоканальным сейсмоакустическим профилированием (НСП) с источником Буммер (частота – 2000 Гц, разрешающая способность - 0,2-0,3 м), а также гидролокацией бокового обзора с использованием ГЛБО "Clein-900", (частота - 450 кГц, ширина обзора – 100 м, разрешающая способность – 0,5 м). Геологический пробоотбор осуществлялся с помощью грунтовой ударной трубки длиной 3 м с внутренними ПВХ вкладышами. Места отбора проб определялись по результатам предварительной интерпретации геофизических данных. Также велось бурение со льда при использовании бурового оборудования компании UWITEC.

Обработка данных, полученных в ходе полевых работ и сопоставление их с результатами предшествующих исследований проводилось с использованием материалов ГК-1000/3 (Максимов и др., 2015) и материалов российско-германского проекта PLOT, опубликованных в нескольких статьях (Andreev et al., 2016; 2019; Gromig et al., 2019; Lebas et al., 2020).

### **Исходные данные**

Материалом для диссертационной работы послужили результаты полевых работ с 2014 по 2019 гг., в ходе которых было проведено более 1200 пог. км профилей сейсмоакустической съёмки и гидролокации бокового обзора (800 пог. км для Ладожского озера и 400 пог. км – для Онежского), отобрано 40 колонок донных отложений длиной до 3 м (получены в ходе пробоотбора с корабля, все в Онежском озере), 2 керна донных отложений длиной до 10 м (получены в ходе стационарного бурения со льда Петрозаводской губы Онежского озера).

Были использованы также данные ГК-1000/3 (лист Р-36, Петрозаводск), материалы выполнения российско-германского проекта PLOT, а также данные незаконченного геологического картирования Онежского озера в масштабе 1:1 000 000, проведенного ОАО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» в 1999 - 2000 гг.

Данные о рельефе дна Ладожского озера получены на основании анализа данных батиметрии, геоморфологической карты третьего поколения, а также вышеописанных данных сейсмоакустического профилирования. Рельеф котловины Онежского озера описан по результатам анализа GRID-модели, составленной в ИВПС Кар НЦ РАН, данных сейсмоакустических исследований и гидролокации бокового обзора.

### **Соответствие диссертации паспорту специальности.**

Диссертация Беляева Павла Юрьевича «Рельеф дна и строение поздневалдайских голоценовых отложений котловин Ладожского и Онежского озёр» соответствует паспорту научной специальности 25.00.25 (Геоморфология и эволюционная география): Формуле паспорта специальности, так как в диссертации рассматриваются вопросы морфологии, генезиса, возраста, а также динамики рельефа в региональном масштабе на рубеже неоплейстоцена-голоцена.

- Областям исследования паспорта специальности, в частности:

-п.2. Структурная геоморфология и морфоструктурный анализ.

-п.6. Динамическая геоморфология.

-п.7. Геоморфология побережий и дна морей и океанов.

-п.14. Методы геоморфологических исследований и геоморфологическое картографирование.

-п.15. Проблемы региональной геоморфологии. Эволюционная география.

### **Научная новизна**

Получены новые данные о строении четвертичных отложений и рельефа дна Ладожского и Онежского озёр, в том числе на основе данных интерпретации многоканального высокоразрешающего сейсмоакустического профилирования и тяжелого колонкового пробоотбора. Проведён анализ отложений, заполняющих озёрные котловины. Выделены типы поверхностей для различных областей озёрных котловин. Выделено несколько участков, являющихся весьма интересными для дальнейшего изучения в виду различных вариантов интерпретации отложений на них. Составлены геоморфологические карты и карта четвертичных отложений для котловин Ладожского и Онежского озера (впервые по конкретным геологическим данным).

**Теоретическая значимость работы** состоит в том, что при сопоставлении данных о рельефе и строении верхнелепестово-голоценовых отложений котловин изучаемых озёр, была дана характеристика геоморфологическим особенностям и строению четвертичного чехла Ладожского и Онежского озёр.

**Защищаемые положения:**

1. Поздневалдайский и голоценовый рельеф дна котловин Ладожского и Онежского озёр представлен следующими основными группами форм: структурная, ледниковая и седиментационная, сформировавшимися в поздневалдайское – голоценовое время.

2. Поздневалдайские и голоценовые отложения, выполняющие котловины изучаемых озёр, имеют схожий характер напластования и составляют единый гляциоседиментационный цикл (снизу-вверх): моренные, фациально замещающие их флювиогляциальные, лимногляциальные и озёрные отложения, однако время их формирования в Ладожском и Онежском озерах различно.

3. Ледниково-озёрные отложения обеих котловин состоят из трех пачек, которые соответствуют различным стадиям приледниковых озёр, отличаются характером слоистости и микроагрегатным составом, что отражает характер поступления обломочного материала, обусловленный положением источника сноса (края ледника).

**Практическая значимость работы** заключается в составлении геоморфологических карт Ладожского и Онежского озера и карты распространения четвертичных отложений Онежского озера. Полученные данные по строению разреза четвертичных отложений, и их пространственному распределению, имеют большое значение для построения палеогеографических реконструкций периода деградации последнего оледенения и становления озерного режима в Ладожском и Онежском озерах. Построенные карты могут быть использованы для актуализации существующих геоморфологических и геологических карт, в том числе, полученных в результате Государственной геологической съемки на соответствующих листах.

**Степень достоверности результатов исследований** определяется кондиционными условиями проведения сейсмоакустических исследований научно-производственными подразделениями научного парка МГУ им. М. В. Ломоносова, сверкой интерпретации геофизических материалов с данными геологического пробоотбора, сопровождаемого результатами палинологических исследований, радиоуглеродного датирования, и данными КТ-рентгенографии, а также данными первого бурения рыхлого покрова Онежского озера в Петрозаводской губе в 2019 году, в котором автор принимал личное участие.

**Личный вклад** автора заключается в получении материалов, в результате работ на протяжении 2014-2020 гг. в рамках грантов РФФИ 18-17-00176, 18-17-00176-П, РФФИ 18-05-00303 и грантов СПбГУ (Шифр ИАС 18.42.1258.2014, 18.42.1488.2015, 0.42.956.2016) с целью изучения строения четвертичного покрова Великих Европейских озёр, выявления геологических опасностей, и при поддержке проведения международной Молодежной практической школы по методам изучения донных ландшафтов в 2016 году. Автором был выполнен сбор, интерпретация, анализ и обобщение геолого-геофизической информации по котловинам Ладожского и Онежского озёр (1000 погонных км сейсмоакустических профилей, 30 колонок донных отложений до 3 м, 2 керны скважин длиной до 11 м), выполнена лично интерпретация данных НСП и их сопоставление с данными геологического пробоотбора. В дальнейшем, при использовании результатов интерпретации геофизических и геологических данных, а также материалов ГК-1000/3 (Максимов и др., 2015; Макарьев и др., 2002), автором была предпринята попытка корреляции четвертичных отложений котловин Ладожского и Онежского озера и составлены обновленные геоморфологические карты Ладожского и Онежского озёр и карта четвертичных отложений для Онежского озера (при содействии как научного руководителя, так и коллег по совместным работам).

**Апробация работы**

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 26 научных работах (общим объемом 126 п. л., из них вклад соискателя 94 п. л.), из них работ, опубликованных в рецензируемых научных журналах (из перечня ВАК) – 2. Доклады по теме исследования были

представлены автором на следующих конференциях: Комплексные морские исследования и образование (КИМО), 2017 год, Москва; Морские исследования и образование (MARESEDU) 2018, 2019, 2020 годы; Щукинские чтения, 2020 год; Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России 2019, 2020 годы; Limnology and Freshwater Biology, 2020 год. Также работа под названием «Рельеф и четвертичные отложения Ладожского озера по результатам многоканального сейсмоакустического профилирования в 2014-2015 гг.» была удостоена третьего места в конкурсе работ на конференции Комплексные исследования морей и океанов – 2017 (Москва, ИО РАН).

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность своему научному руководителю Рыбалко Александру Евменьевичу за значимые на всех этапах корректировки в работе, Субетто Дмитрию Александровичу за организацию полевых работ по изучению четвертичного чехла котловин Ладожского и Онежского озёр, Кузнецову Владиславу Юрьевичу и Савельевой Ларисе Анатольевне за предоставленные датировки по отложениям Онежского озера, Токареву Михаилу Юрьевичу и сотрудникам ЦМИ МГУ за организацию геофизической съёмки, Зобкову Михаилу Борисовичу за предоставленные данные по батиметрии Онежского озера, Назарову Дмитрию Владимировичу за значимые советы по улучшению излагаемых в работе данных. А также всем участникам грантов, указанных в разделе «Личный вклад», сотрудникам отдела региональной геологии и полезных ископаемых западных районов ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского, в особенности Семёновой Людмиле Риммовне; сотрудникам отдела аспирантуры ВСЕГЕИ и экипажам НИС «Эколог» и «Профессор Зенкевич».

**Объём работы** составляет 115 стр. текста, 45 иллюстраций 3 приложения.

### **Структура работы, краткое содержание глав:**

#### **Введение**

Описана основная цель работы. Дана краткая характеристика, освещена проблема недостаточной изученности отложений, выполняющих котловины Ладожского и Онежского озёр и их рельефа. Показана значимость изучения данных объектов.

#### **Физико-географическое описание**

Ладожское озеро – крупнейшее озеро Европы, служит источником пресной воды для части Карелии и Ленинградской области и занимает важное место в социально-экономической жизни северо-запада. Площадь водосбора составляет около 276 000 км<sup>2</sup>, площадь озера-18135 км<sup>2</sup>, его наибольшая длина – 220 км, ширина – 124 км, средняя глубина – 51 м, объём воды – 908 км<sup>3</sup>. Период водообмена – 12,3 года. В южной части озера преобладают глубины до 20 м, в северной они увеличиваются до 230 м. Ладожское озеро объединяет в себе системы трёх озёр: Сайма, Ильмень и Онежское. Наиболее значительными водотоками являются реки: Волхов, Свирь, Вуокса, Сясь, Оять, Паша и Мста. Основными притоками, через которые поступает 80% стока являются реки Свирь, Вуокса и Волхов. 9% общего притока дают реки Паша и Оять, впадающие в Свирь. Остальные 11% поступают за счёт более мелких водотоков (Субетто и др., 2013).

Поступление взвешенных веществ в озеро осуществляется по большей части через реки Волхов и Свирь, на них приходится 78% всего привносимого вещества. Кроме них также в образовании твёрдого стока в озеро активное участие принимают реки Бурная, Паша, Оять и Сясь, вместе эти реки составляют 93% привносимого в озеро материала. Всего за год в озеро поступает 1200000 т·год<sup>-1</sup> (Усенков, 2012). Отток осадочного материала из озера происходит через Неву. Величина изымаемого рекой твёрдого стока составляет 462 т. л. (Семенович, 1966).

Онежское озеро является вторым по величине озером в Европе. Водосборный бассейн озера имеет площадь 62,8 тыс. км<sup>2</sup>, основная часть озера находится на территории Республики Карелия. Площадь зеркала озера с островами составляет около 10 тыс. км<sup>2</sup>, а без островов — 9,7 тыс. км<sup>2</sup>. Объём водной массы 292 км<sup>3</sup> (Ладожское озеро. Мониторинг..., 2000). Средняя глубина озера — 31 м, а наибольшая — 120 м. В Онежское озеро впадают около 50 рек и свыше 1000 малых водотоков. Вытекает из озера река Свирь, которая соединяет его с Ладожским. Озеро является

важным связующим звеном Волго-Балтийского и Беломорско-Балтийского водных путей.

### **История изучения четвертичных донных отложений Ладожского и Онежского озёр**

История изучения Ладожского и Онежского озёр подразделяется на 3 этапа:

1 этап – посвящён общим естественнонаучным исследованиям. Были получены сведения о физико-географических условиях, гидрологических, геоморфологических, ландшафтно-геохимических условиях Ладожского и Онежского водосборов; о составе и распространении донных отложений. Наиболее активные исследователи региона на данном этапе: А. А. Иностранцев, Н. И. Семенович, К. К. Марков, К. К. Гильзен, Н. И. Эраси, И. В. Молчанов. Результаты исследований этого этапа были изложены в монографии Н. И. Семеновича на тему геолого-геоморфологических особенностей Ладожской и Онежской котловин (Семенович, 1966; Семенович, 1973).

2 этап – относится к началу семидесятых годов. Велись исследования, направленные на решение задач региональной геологии, геоэкологии, геохимии и седиментологии. Зачастую, эти исследования имели частный характер и велись на малых площадях. Наиболее активными исследователями этого этапа являются: Н.Н. Давыдова, Д.Д. Квасов, И. Н. Демидов, С. А. Абрамова, Д.А. Субетто, А.Е. Рыбалко, В. И. Хомутова, С.М. Усенков, А.В. Амантов, Г.С. Бискэ и др. (Усенков, 2012). Результаты работ второго этапа были обобщены в следующих монографиях: (Субетто, 2013; Гуревич и др., 1995; Усенков, 2012). Также во время данного этапа ОАО ПМГРЭ велись комплексные геологические исследования на Онежском озере (Макарьев, 2002).

3 этап – начинается примерно в 2010 году. Ведутся комплексные исследования на акваториях обоих озёр при участии сотрудников ИВПС Кар НЦ РАН МГУ, СПбГУ, ИГ СО РАН и ряда других организаций. Эти исследования характеризуются использованием нового полевого и лабораторного оборудования. Они направлены на актуализацию данных предшественников, а также на подготовку материала для детальных палеогеографических реконструкций северо-запада РФ. Во время данного этапа был издан лист Р-36 ГК-1000/3 (Максимов и др., 2015), который охватывает и изучаемые озерные котловины.

В настоящее же время, на Ладожском озере с начала 2000-х годов крупных геологических изысканий в изучаемой области не велось, за исключением исследований в рамках российско-германского проекта PLOT (Andreev et al., 2016). С 2014 года исследования морфологии дна и верхнечетвертичных отложений озёр были возобновлены. Для исследования применяются: сейсмоакустическое профилирование, гидролокация бокового обзора, геологический пробоотбор и бурение. В исследованиях участвуют представители СПбГУ, ИВПС Кар НЦ РАН, МГУ и других организаций. Используется новейшее геофизическое и пробоотборное оборудование, впервые были предприняты попытки корреляции четвертичных отложений изучаемых озёр. Цель работ - подготовка фундаментальной научной базы, решение прикладных задач геоэкологии, и отработка методики геологического изучения акваторий. Работы выполняются при поддержке грантов РФФИ и РНФ. По результатам данных работ автором неоднократно опубликованы материалы на различных отечественных и международных конференциях и статьи в рецензируемых журналах, которые положены в основу настоящей диссертации.

### **Геология и геоморфология**

В данной главе в соответствующих подразделах приведены данные предшествующих исследователей о строении коренных пород, слагающих дно котловин обоих озёр, а также сведения о четвертичных отложениях, заполняющих котловины озёр и слагающих прилегающую сушу в районе исследований.

#### **Строение дочетвертичных образований**

Котловина Ладожского озера образовалась в начале позднего протерозоя, а её дальнейшее моделирование осуществлялось деятельностью ледников. В структурном отношении находится на сочленении Балтийского щита и Русской плиты, занимая Ладожскую депрессию (Антропов и др., 1960; Субетто и др., 2009; Амантов, 2014). Строение дочетвертичного фундамента Ладожской котловины представлено различными гранитоидами, метаосадочными и метавулканогенными породами, пронизанными интрузиями. Распространение комплексов дочетвертичных пород

связывается авторами с неотектонической активностью (Бискэ, 1987; Ассиновская, Никонов, 1998) либо же с рельефом и экзогенными геоморфологическими процессами, что типично для окраин кристаллических щитов (История..., 1990; Амантов, 2015).

Онежское озеро занимает палеопротерозойский прогиб, называемый Онежской депрессией (Онежская..., 2011). Северная часть котловины относится к Северо-Онежскому синклинию (Никонов и др., 2017), а южная – к Южно-Онежскому блоку. Южная область депрессии является единым бассейном с глубиной не более 30 м и постепенным обмелением к югу. Северная часть депрессии является изометричной впадиной, которая в структурном отношении включает в себя Заонежский полуостров, совокупность заливов и озёр, входящих в систему Онежского озера с севера и наиболее глубокую центральную часть озера. В пределах Онежской структуры выделяется 4 наложенные формы: депрессия в северной части; куполовидное поднятие, формирующее Заонежский полуостров; грабенообразный прогиб, образующий южную часть котловины; многочисленные линейные зоны, за счёт которых образовано множество гряд и депрессий (Онежская..., 2011). Дно котловины Онежского озера сложено в основном, породами протерозойского возраста.

### **Строение четвертичных отложений**

#### *Котловины Ладожского и Онежского озёр*

По данным предшествующих исследователей (Бискэ, 1959; Шемякина и др., 1991; Давыдова и др., 1993, Субетто и др., 2009), в основании четвертичных отложений, заполняющих котловину изучаемых озёр, залегают морена осташковского оледенения (gШos). Она покрывает дно котловин фактически полностью и представлена валуносодержащими глинистыми песками с аномальной плотностью или песчаными глинами серого и коричневатого цвета. Присутствует включения обломков изверженных, метаморфических пород, песчаников и аргиллитов. Мощность до – 80 м. Выше по разрезу залегают флювиогляциальные отложения (fШos). Представлены песками и галькой, в нижней части, предположительно, содержат перемытую морену. Формируют озы, выполняют днища погребённых долин. Мощность – до 104 м (Шемякина и др., 1991). Выше по разрезу залегают лимногляциальные отложения (lgШos, lgШbl). Образованы в результате ледниково-озёрного седиментогенеза. Представлены глинами с различными типами слоистости, разделяемыми по границе размыва и мощности слоёв. По геоморфологическим признакам выделяются слои, отвечающие стадии Сальпаусселькя III (Korsman, 1984). В виду недостаточности информации, на территории Карелии эти слои не расчленены. Мощность – до 10 м.

Верхняя часть отложений сложена голоценовыми озёрными отложениями (lnH). Их образование связано с озёрным седиментогенезом. На дне озёр в их состав входят илы, алевропелиты и гитии с прослоями песков и алевролитов. Мощность – до 5 м. Содержат прослойки гидроокислов марганца и вивианита (Страховенко и др., 2018).

### **Методы исследований**

#### *Ладожское озеро*

Строение четвертичных отложений и рельефа котловины Ладожского озера было охарактеризовано по результатам полевых работ, в ходе которых проводилось многоканальное непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП). По результатам анализа данных НСП были получены представления о рельефе дна, мощности и строении четвертичных отложений, были установлены признаки геоморфологических процессов, формирующих дно озера. НСП велось при скорости 5-6 узлов. Был использован комплекс сейсмоакустического оборудования, включавший в себя источник типа бумер, 16-канальную пьезокосу, регистрирующую станцию Spectrageo, накопитель энергии и комплект навигационного оборудования. Глубина погружения источника составляла 0,3 м, длина приёмной линии – 30 м, разрешающая способность 0,2-0,3 м. Сбор геофизических данных осуществлялся в формате SEG-Y, навигационных данных в формате nmea. Первичная обработка проводилась в программном пакете RadExPro, а последующая обработка и интерпретация в программе KINGDOM. По результатам были установлены границы распространения различных типов отложений, характер их залегания и некоторые

геоморфологические особенности дна котловины. В ходе интерпретации было выделено 5 типов отложений: современные озёрные отложения (InH), лимногляциальные (lgIIIos), морены (gIIIos), флювиогляциальные отложения (fIIIos), выделенные по косвенным признакам гравитационные отложения (ldIIIH) и ундальювий (lvIII-IV). Интерпретация проводилась по характеру сейсмоакустической записи, опираясь на опыт предшествующих отечественных (Амантов, Спиридонов, 1989; Барков и др., 1983; Давыдова и др., 1986; Петрова, 1982; Субетто и др., 2013) и зарубежных исследователей (Andreev et al., 2016; Gromig et al., 2019; Lebas et al., 2020). На рис. 1 дана схема расположения фактического материала на Ладожском озере.



Рис. 1. Схема расположения фактического материала на акватории Ладожского озера и ключевых интерпретационных участков. Также дано место расположения буровой скважины российско-германской экспедиции в 2013 году.

### *Онежское озеро*

На акватории Онежского озера параллельно с работами по НСП велась гидролокация бокового обзора (ГЛБО) при скорости 4-6 узлов. Работы по НСП проводились с тем же самым оборудованием, что и на акватории Ладожского озера. Для ГЛБО использовалась аппаратура Klein-900 со следующими характеристиками: частота излучения – 450 кГц, ширина обзора – 100 м, разрешающая способность – 0,5 м. В дальнейшем, на основании анализа геофизических данных были выбраны точки для бурения в Петрозаводской губе.

Также на акватории Онежского озера проводился геологический пробоотбор при помощи грунтовой трубки весом 300 кг, длиной 3 м и диаметром 127 мм. Всего за период полевых работ было получено 40 грунтовых колонок длиной до 3 м. В 2019 году было проведено первое в истории бурение в Петрозаводской губе со льда при использовании комплекса оборудования производства фирмы UWITEC, в ходе которого было получено 2 керна длиной до 12 м (Рыбалко и др., 2019). На рис. 2 приведена схема расположения фактического материала на акватории Онежского озера.

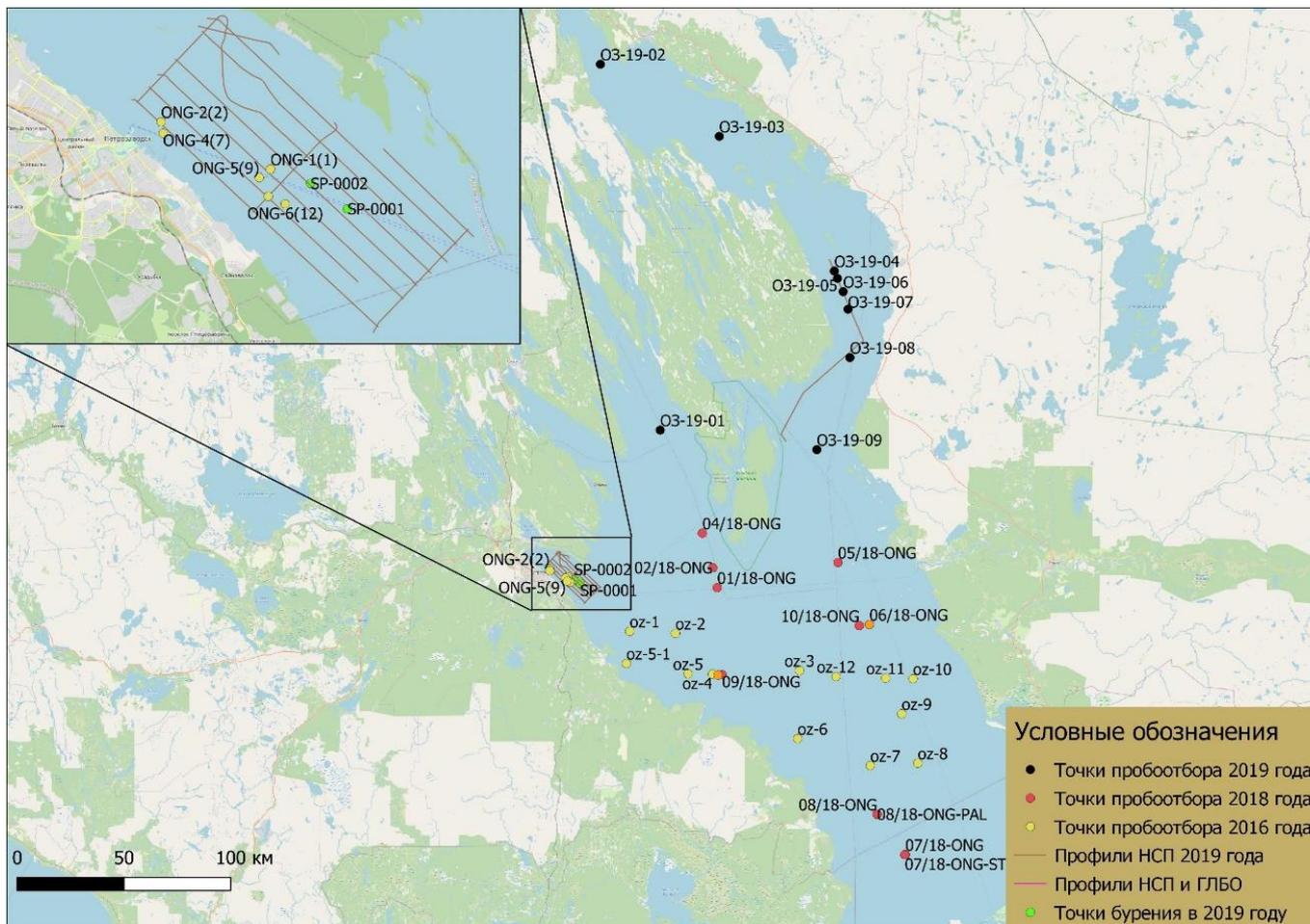


Рис. 2. Общее расположение точек пробоотбора и геофизических профилей на акватории Онежского озера.

По результатам обработки результатов полевых исследований, были составлены геоморфологические карты и карта четвертичных отложений для котловин Ладожского и Онежского озёр, представленные в качестве приложений к данной работе.

### Рельеф и четвертичные отложения Ладожского озера

#### *Интерпретация данных непрерывного сейсмоакустического профилирования*

Для описания строения верхнеплейстоцен-голоценового чехла и геоморфологических особенностей котловины Ладожского озера был выбран осевой сейсмоакустический профиль, проходящий через середину озера и 6 профилей в районе острова Коневец (рис. 2). На основании интерпретации результатов НСП было выделено 5 сеймопачек. ИН – голоценовые озёрные осадки, lg<sub>1</sub>III, lg<sub>2</sub>III, lg<sub>3</sub>III – лимногляциальные отложения, gIIIos – морены, fIIIos – флювиогляциальные отложения. Ниже представлен фрагмент сейсмоакустической записи с типичным разрезом четвертичных отложений, заполняющих дно Ладожского озера. Глубина примерно 100 м. Рельеф дна плоский, в геоморфологическом отношении описываемая часть дна котловины представляет собой озерную аккумулятивную равнину. Характерным для этого типа рельефа является выположенность и субгоризонтальное или пологоволнистое залегание слоёв.

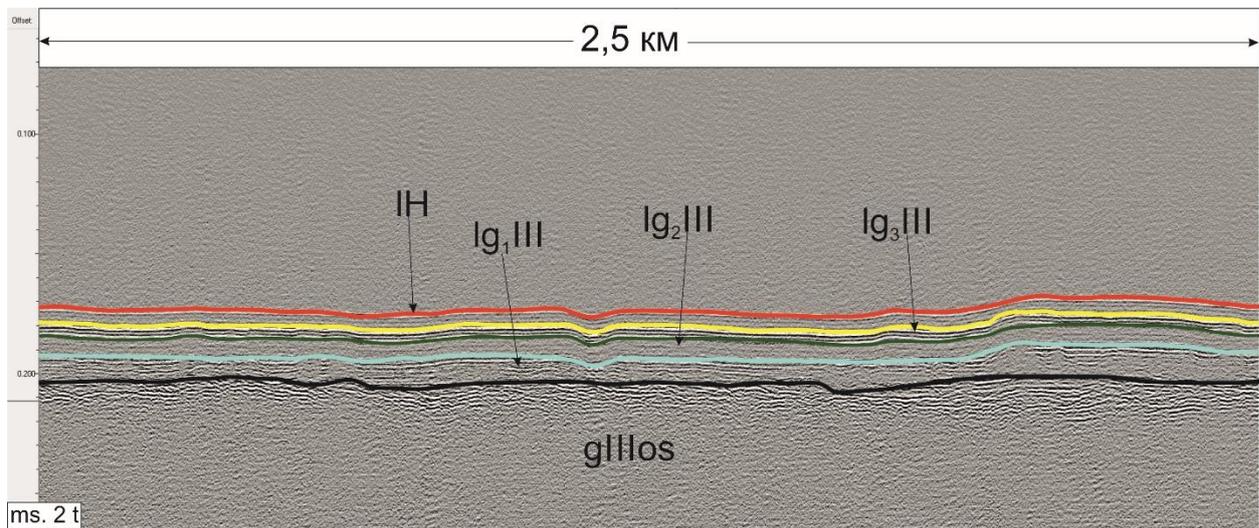


Рис. 3. Участок № 1. Фрагмент сейсмоакустического профиля, на котором представлен типовой разрез четвертичных отложений в южной части озера. Условные обозначения: IИ – голоценовые озёрные осадки, Ig<sub>1</sub>III, Ig<sub>2</sub>III, Ig<sub>3</sub>III – лимногляциальные отложения, gIIIos – морены ошашковского возраста.

В основании разреза залегают отложения (gIIIos). Характеризуются хаотичным характером записи, обилием коротких, чётких разноориентированных рефлекторов. Верхняя граница чёткая, резкая и неровная. Нижняя граница на сейсмоакустической записи не выделяется. По характеру записи, геоморфологическим признакам кровли и стратиграфическому положению, эти отложения могут быть определены как морены ошашковского горизонта (Амантов, Спиридонов, 1989, Давыдова и др., 1986).

Выше по разрезу залегает сеймопачка (Ig<sub>1</sub>III). Характеризуется неясной субгоризонтальной слоистостью, которая обусловлена текстурой проксимальных ленточных глин и частичной акустической прозрачностью, обусловленной, вероятно, наличием перемытых флювиогляциальных отложений. Мощность – 17-20 м. Кровля чёткая, характер залегания облекающий, в кровле имеется несколько палеоврезов. Выше залегают скрытослоистые отложения (Ig<sub>2</sub>III). Мощность – 12-15 м. Характер залегания облекающий. Заполняют палеоврезы в нижележащей сеймопачке. Отложения средней сеймопачки (Ig<sub>2</sub>III) перекрыты осадками верхней (Ig<sub>3</sub>III). Мощность – 8-10 м. Слоистость чётко выраженная, субгоризонтальная. Характер залегания облекающий. Три выделенные сеймопачки отнесены к лимногляциальным отложениям по результатам сопоставления с данными ОАО «Севморгео» (Рыбалко и др., 2007). Верхняя часть разреза сложена современными озёрными отложениями (IИ). Характеризуются скрытой слоистостью и облекающим характером залегания. Верхняя граница чёткая, по ней, как правило, отбивается линия рельефа дна. Мощность – 10-12 м. Данные осадки характерны для областей типичной нефелоидной седиментации. Залегание осадков на дне Ладожской котловины зачастую согласное. Озёрные голоценовые осадки (IИ) могут выклиниваться из-за влияния подводных течений, либо геоморфологических особенностей, препятствующих их накоплению. Помимо типов отложений, выделенных на данном участке, по геоморфологическим признакам были интерпретированы также флювиогляциальные и декливиальные (оползневые) отложения. В итоге, по результатам интерпретации данных НСП, были выделены 6 типов отложений и прослежена изменчивость рельефа с юга на север, где в южной части рельеф менее расчленён, чем в северной, меньше глубины и мощность сеймопачки (IИ) также меньше, вплоть до её выклинивания, что может являться следствием влияния гидродинамических условий.

С точки зрения геолого-геоморфологического строения района на севере Ладожского озера, интерес представляют участки вблизи острова Коневец. Здесь 4 профилями пересекается подводная долина, расширяющаяся к северу. Кроме того, в этом месте в рамках проекта PLOT, при сотрудничестве российских и германских исследователей, было проведено бурение озёрных отложений, что дало возможность получить подробный литолого-стратиграфический разрез для данного района (Andreev et al., 2016; Gromig et al., 2019; Lebas et al., 2020). На рис. 4 приведён фрагмент сейсмоакустической записи с места отбора колонки 1309.

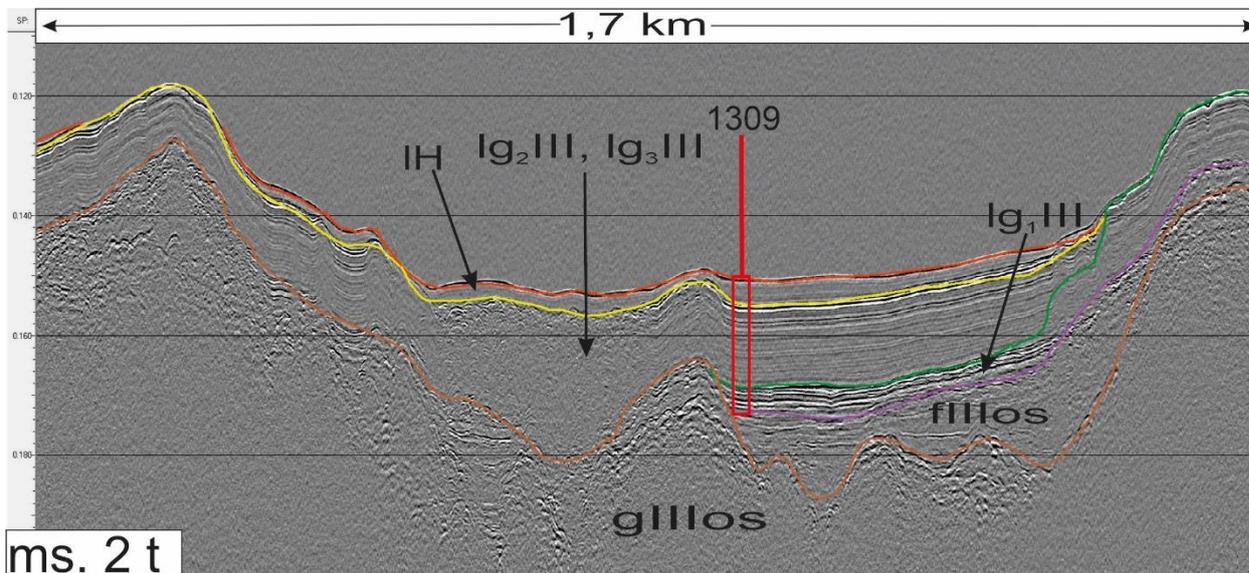


Рис. 4. Фрагмент сейсмоакустического профиля с места отбора интерпретационной колонки донных отложений. Условные обозначения: IH – современные озёрные осадки,  $lg_1III$ ,  $lg_2III$ ,  $lg_3III$  – толщи лимногляциальных отложений, соответствующих различным стадиям приледниковых озёр, fIIIos – флювиогляциальные отложения. Красной стрелкой показано место отбора колонки 1309 (Andreev et al., 2016).

В основании разреза в этой области залегают флювиогляциальные отложения (fIIIos), однако, существует и альтернативное мнение о генезисе нижних горизонтов вскрытой толщи (Andreev et al., 2019; Gromig et al., 2019). Характеризуются ярко выраженной, хаотичной слоистостью и частичной акустической прозрачностью, о чём можно судить по различной ориентировке рефлекторов. Выше по разрезу залегают лимногляциальные отложения ( $lg_1III$ ). Характеризуются чётко выраженной субгоризонтальной слоистостью, частичной акустической прозрачностью и облекающим характером залегания по отношению к нижележащим. Возможно, содержат в нижней части перемытые флювиогляциальные отложения, о чём свидетельствует местами пропадающая запись. Перекрываются пачкой лимногляциальных отложений, характеризующихся скрытой слоистостью – ( $lg_2III$ ). Слоистость имеет облекающий характер залегания по отношению к ( $lg_1III$ ) и чёткий контакт с ней. Перекрывают ( $lg_2III$ ) отложения ( $lg_3III$ ). Характеризуется, как и ( $lg_1III$ ), чётко выраженной субгоризонтальной слоистостью. Контакт с вышележащей пачкой чёткий. Вероятнее всего, данная пачка сложена дистальными ленточными глинами. Венчают цикл осадконакопления современные озёрные отложения (IH). Характеризуются неярко выраженной субгоризонтальной слоистостью. В геоморфологическом отношении, на данном участке наблюдается самая южная часть погребённой долины, расширяющейся с юга на север. Выполнена долина во флювиогляциальных отложениях, что подтверждается данными НСП. Также это подтверждено данными бурения (Gromig et al., 2019). Ниже приведено описание состава данной колонки и её схематичное изображение (рис. 5).

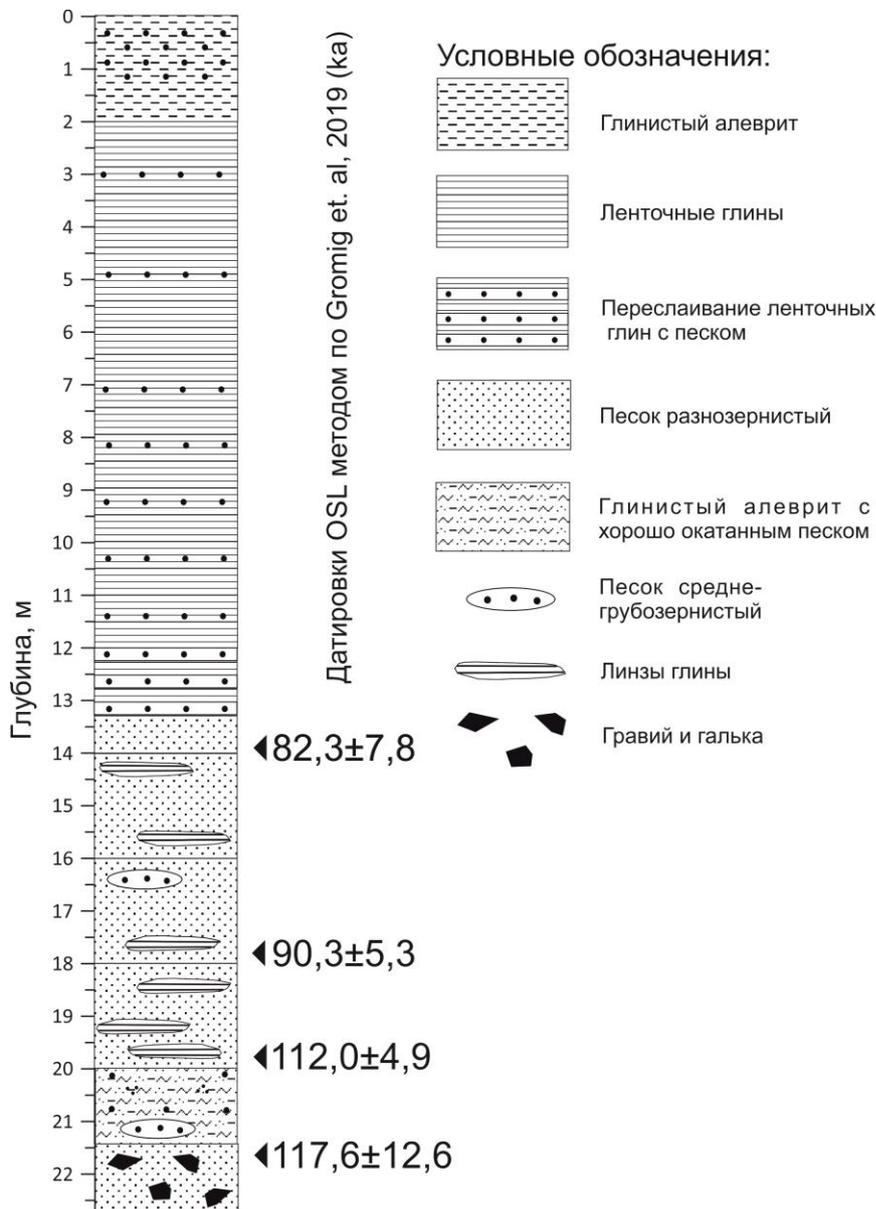


Рис. 5. Схематичное изображение колонки 1309 с датировками (Andreev et al., 2016; 2019).

Данная колонка вскрывает четвертичные отложения Ладожского озера и сопоставляется с данными геофизических исследований. Спорным является момент с определением залегающих в основании песчано-галечных отложений. По данным проекта PLOT, эти отложения были интерпретированы как морские отложения микулинского межледниковья. Такой вывод был сделан на основании OSL-датировок (Andreev et al., 2019; Gromig et al., 2019; Lebas et al., 2020). Однако, вопрос о генезисе, как и о возрасте этих отложений остается дискуссионным, в частности, это обсуждается в статье А. Лудиковой, где приведены данные диатомового анализа предполагаемых морских отложений и обсуждается неоднозначность этой трактовки (Ludikova et al., 2020). В данной работе, эти отложения отнесены к флювиогляциальным, поскольку формы погребённого рельефа, наблюдаемые на остальной части озера, в строении которых выделяются отложения (fШOs), по морфологии схожие с русловыми отложениями подледниковых потоков. При соотношении наших исследований с данными ГК-1000/3 (Максимов и др., 2015), на побережье Ладожского озера в этом районе выделяются формы рельефа флювиогляциального генезиса и месторождения песка с крупнообломочным материалом, имеющего явный флювиогляциальный генезис, что также даёт основания интерпретировать описываемые отложения как флювиогляциальные. Выше по разрезу залегают маломощные глинистые алевриты с прослоями песка, вероятно являющиеся переходным горизонтом от флювиогляциальных к озёрным отложениям. На интервале 20-21 м залегают глинистые алевриты с включениями хорошо окатанного песка, относящиеся к нижней пачке лимногляциальных отложений (I<sub>g</sub>III). На

интервале 13,5-20 м залегают среднезернистые пески с линзами глины, относящиеся к (I<sub>g2</sub>III). Перекрывают их отложения, которые можно рассматривать как горизонт, переходный между различными пачками лимногляциальных отложений. Выше по разрезу залегают ритмично переслаивающиеся глины и алевриты, относящиеся к (I<sub>g3</sub>III). Верхние 2 м сложены глинистыми алевритами низкой плотности, в верхней части которых появляются включения песка, отнесены к (I<sub>n</sub>H). На основании сопоставления колонки 1309 и данных НСП, область дна к северу от острова Коневец охарактеризована как озёрная аккумулятивная равнина на флювиогляциальном цоколе, которая осложнена реликтовой подводной долиной. Поскольку изначально долина образована во флювиогляциальных отложениях, есть основания полагать, что это долина стока талых ледниковых вод. Её конфигурация и местоположение отражены на геоморфологической схеме (рис. 6). Результаты геологического пробоботора в заливе Лехмалахти (Рыбалко, 1985) позволяют более подробно описать строение озёрно-ледниковых отложений Ладожского озера.

#### *Геоморфологическая схема дна Ладожского озера*

По результатам анализа геолого-геоморфологических особенностей Ладожской котловины была построена геоморфологическая схема дна Ладожского озера (рис. 6).

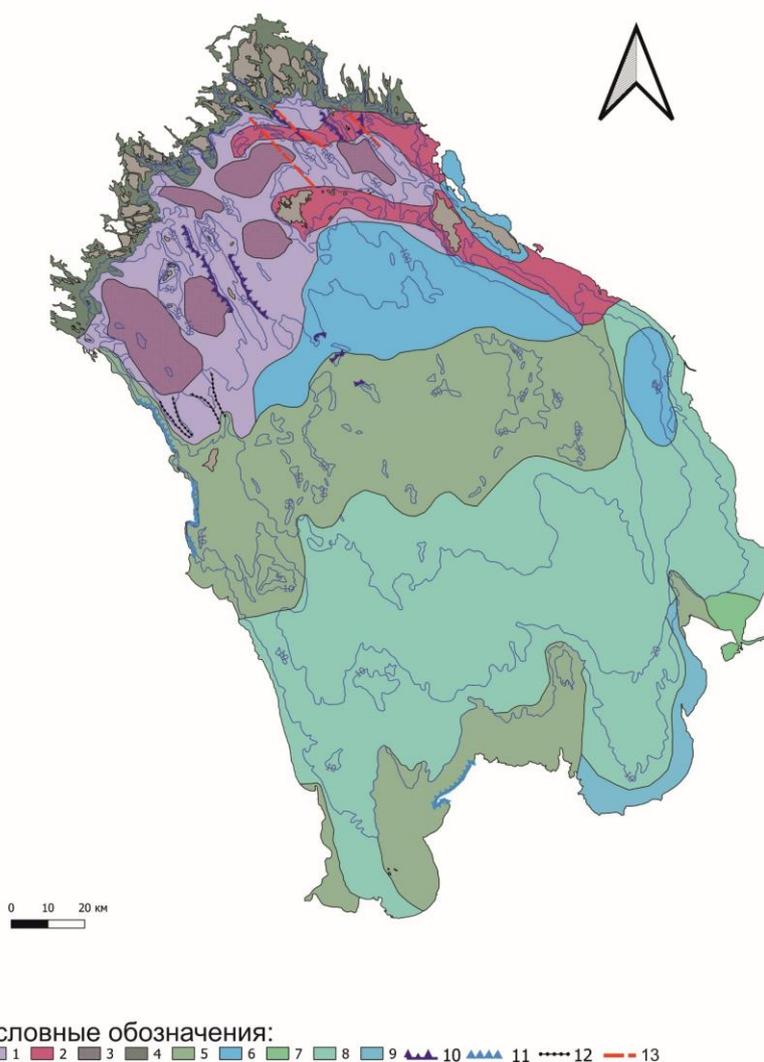


Рис. 6. Геоморфологическая схема Ладожского озера

Условные обозначения: *Рельеф структурно-денудационной группы*: 1. Интенсивно расчлененные грядово-увалистые и фиардово-шхерные равнины на кристаллическом субстрате с проявлением современных геодинамических процессов; 2 Массивы и гряды, сформировавшиеся за счет препарирования пластовых интрузивных тел; 3. Структурно-

предопределенные впадины в фиардово-шхерных равнинах с покровом озерных нефелоидов. *Рельеф аккумулятивно-денудационной группы*: 4. Грядово-волнистые равнины на отпрепарированных породах кристаллического субстрата, осложнённые аккумулятивными возвышенностями ледниковой природы; 5. Холмисто-увалистые равнины ледниковые и ледниково-озерные равнины на моренном субстрате (зоны краевых образований). *Рельеф аккумулятивной группы*: 6. Выровненные, местами всхолмленные, озерные нефелоидные равнины; 7. Озерно-аллювиальные плоские равнины; 8. Субгоризонтальные выположенные ледниково-озерные равнины; 9. Ундальювиальные, слабо наклоненные, равнины; *Прочие условные обозначения*: 10. Предполагаемые гравитационные склоны; 11. Абразионные берега; 12. Погребённые долины, выделенные по данным НСП; 13. Рельефообразующие разломы, выделенные по данным НСП

### Строение четвертичных отложений дна Онежского озера

Данные о строении верхнеплейстоцен-голоценовых отложений Онежского озера были получены в ходе работ, проводившихся с 2016 по 2019 гг. (Рыбалко и др., 2019). Кроме того, были использованы: описание колонок донных отложений (Курочкина, 1976), данные результатов геологической съёмки ПМГРЭ (Макарьев, 2002) и ГК-1000/3 (Максимов и др., 2015). Эти исследования охватывали весь четвертичный покров на дне озера, представленный отложениями последнего гляциоседиментационного цикла.

*Строение четвертичных отложений дна Онежского озера по результатам сейсмоакустического профилирования*

Перед работами по геологическому пробоотбору, велись геофизические исследования дна Онежской котловины. Ниже (рис. 7) приведён типичный сейморазрез дна Онежского озера.

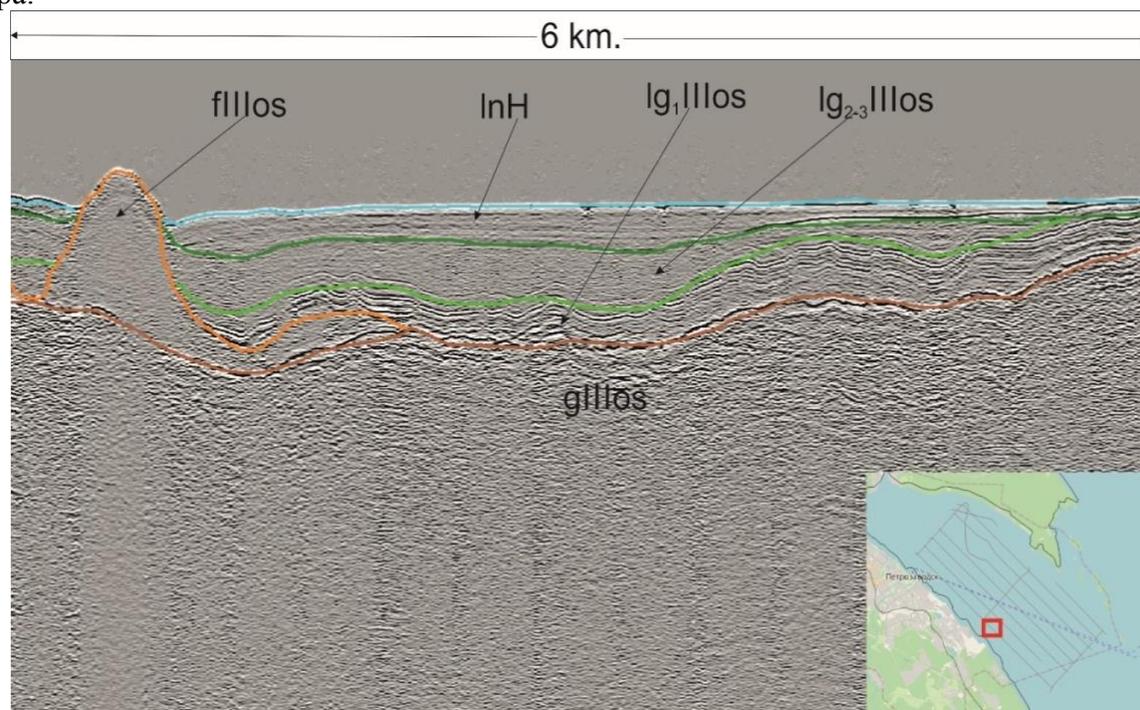


Рис. 7. Фрагмент профиля НСП. Показано строение четвертичных отложений Онежского озера. В правом нижнем углу дано расположение участка. Описание дано в тексте.

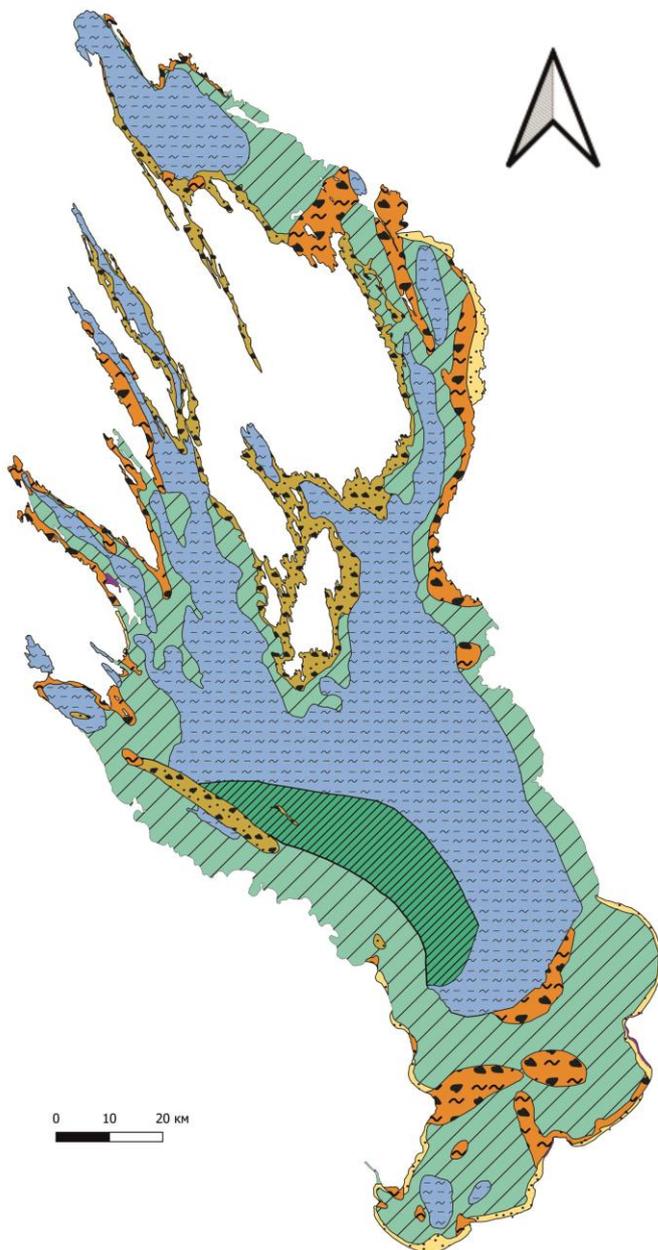
В основании разреза залегает морена осташковского горизонта (glllos). Она выделяется по хаотичному расположению рефлекторов. Частично перекрывается, либо фациально замещается флювиогляциальными отложениями (flllos), которые характеризуются частично скрытой слоистостью и выделяются по геоморфологическим признакам, а также по характеру записи. Отличаются акустической прозрачностью. Выше по разрезу залегают отложения нижней пачки лимногляциальных отложений (lglllos). Характеризуются ярко выраженной субгоризонтальной слоистостью. Они перекрываются отложениями второй и третьей пачки, которые невозможно разделить на данном фрагменте, поэтому им присвоено общее обозначение (lgllllos<sub>2-3</sub>).

Характеризуются скрытой слоистостью. Данные геологического пробоотбора позволяют произвести более подробное расчленение этой сейсмopачки. Верхняя часть сейсмopазреза представлена типичными озёрными нефелоидными отложениями (InH). Характеризуются неясной субгоризонтальной слоистостью.

*Строение четвертичных отложений дна Онежского озера по результатам геологического пробоотбора*

В основании разреза выделяются морены осташковского горизонта (gШos). Были вскрыты в Петрозаводской губе на глубине 4,85-5,44 м от поверхности дна. Представлены тугопластичными глинами серо-коричневого цвета с прослоями супесей, включениями красноватого песка и примесью гальки. Присутствует зона ожелезнения, отчего осадок приобретает коричневато – буровые тона. К низу плотность возрастает, также возрастает доля песчано-галечной фракции. Выше по разрезу, местами замещая моренные, залегают флювиогляциальные отложения (fШos). Вскрыты на станциях OZ-4 и SP-002. Представлены глинистыми песками коричнево-серого цвета, галькой, песчано-глинисто-алевритовыми микритами, дресвой. Присутствие глинистой фракции в их верхней части, вероятно, является следствием размыва и переотложения в перигляциальные бассейны. По всей площади дна котловины морена и флювиогляциальные отложения перекрыты лимногляциальными отложениями (lgШos), которые разделены на 3 последовательно чередующиеся пачки, отвечающие различным этапам существования приледниковых водоёмов. Нижняя пачка (lg<sub>1</sub>Шos) вскрыта в Петрозаводской губе бурением и колонковым пробоотбором в заливе Большое Онего (2018 год). Представлены ритмичными коричневыми тугопластичными глинами, серыми песками и песчано-глинисто-алевритовыми микритами. Преобладание песчаной фракции отмечается в нижней части пачки. Наблюдаются прослой песка до 6 см. Залегающие выше отложения (lg<sub>2</sub>Шos) представлены ритмично переслаивающимися песчаными алевритами серого-тёмно серого цвета и мягко-тугопластичными ленточными глинами серо-коричневого и буровато-серого цвета. Контакт зачастую постепенный, однако на верхней границе местами заметны следы размыва. Верхняя пачка лимногляциальных отложений (lg<sub>3</sub>Шos) представлена микрослоистыми глинами серого, светло-бурого, коричнево-серого цвета иногда с кремоватым либо зеленоватым оттенком, которые переходят в однородные светло-серые текуче-пластичные глины. Присутствуют прослой аутигенных минералов (Страховенко и др., 2018), линзы песка, розоватых глин. В Петрозаводской губе нижняя часть лимногляциальных отложений содержит прослой песчанистых алевритов. Нижний контакт обычно постепенный, верхний может быть согласным, либо с отчетливым перерывом. Верхняя часть отложений котловины Онежского озера представлена озёрными отложениями (InH). Они вскрыты повсеместно бурением и колонковым пробоотбором. Сложены текуче-пластичными и текучими глинистыми алевритами и алевропелитами серого и зеленовато-серого цвета (нижняя часть). Верхняя часть сложена гитиями и жидким глинистым наилком тёмно-бурого цвета. наблюдаются прослой песка, органики и аутигенных минералов. Также в Петрозаводской губе, Заонежском, Повенецком и в Заливе большое Онего, верхняя часть этих отложений содержит железистую корку. Местами наблюдается размыв или угловое несогласие в нижней части.

По результатам анализа рельефа и строения четвертичных отложений котловины Онежского озера, были построены схемы четвертичных отложений (рис. 8) и геоморфологического строения (рис. 9).



Условные обозначения:



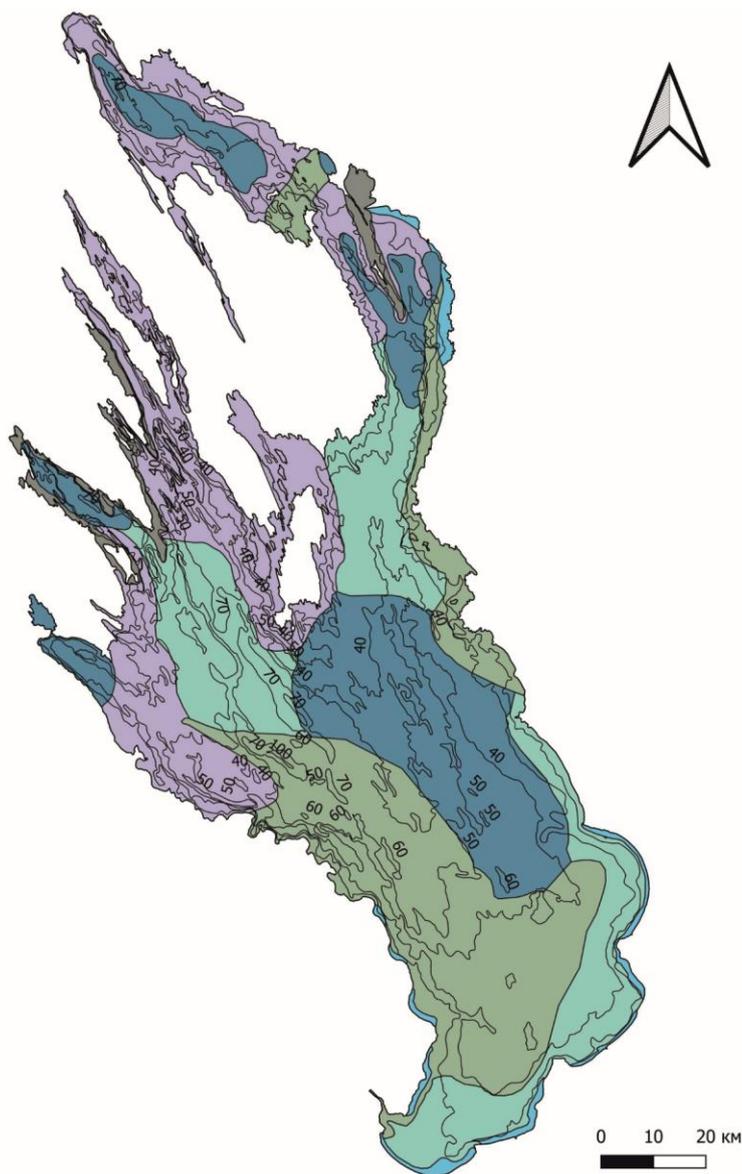
Рис. 8. Схема четвертичных отложений котловины Онежского озера

Большую часть дна котловины Онежского озера занимает покров нефелоидных **озёрных отложений (InH)**. Развиты в центральной части озера в зоне прохождения 50-метровой изобаты, а также в закрытых частях заливов. **Ундальювиальные озёрные отложения (lvIII-H)**. Распространены в южной, юго-восточной и северо-восточной прибрежной части до глубины 15 м. У северного берега озера в окрестностях полуострова Заонежье распространены до 10-метровой изобаты. **Лимногляциальные отложения (IgIII)**. Выходят на поверхность вследствие подводного размыва, либо из-за различных геоморфологических особенностей дна, препятствующих накоплению отложений InH. Описываемые осадки вскрываются в части котловины с глубинами менее 50 м. **Морены ошашковского возраста (gIIIos)**. Выходят на поверхность в прибрежной части Кондопожского и Повенецкого заливов, пересекают узкую часть Заонежского залива, обнажаются на восточном берегу Заонежского залива и в районе мыса Петропавловский. Слагают различные грядовые формы рельефа, развитые до глубины 30 м. **Флювиогляциальные отложения (fIIIos)** фациально замещают морены, слагают вытянутые гряды, аккумулятивные поля, выходят на поверхность в прибрежной части на севере озера. **Дочетвертичные образования**

выходят на поверхность только в районе мыса Андомский и северной оконечности о. Суйсари (северо-западная часть озера). Выход коренных пород в данных местах очевидно, обусловлен резким перепадом глубин и гидродинамическим условиям, препятствующим накоплению отложений.

#### *Геоморфологическая характеристика котловины Онежского озера*

На основании анализа карты четвертичных отложений, а также GRID-модели рельефа, была построена геоморфологическая карта дна Онежского озера. Легенда составлена на основе геоморфологической карты из комплекта ГК-1000/3 (Максимов и др., 2015). В рамках карты было выделено 5 типов подводных поверхностей. Карта дана в качестве приложения к данной работе. Ниже приведена геоморфологическая схема (рис. 9).



#### Условные обозначения

1 2 3 4 5 6 7 —

Рис. 9. Геоморфологическая карта-схема Онежского озера.

Условные обозначения: *Рельеф структурно-денудационной группы*: 1. Интенсивно расчлененные грядово-увалистые и фиардово-шхерные равнины на кристаллическом субстрате с проявлением современных геодинамических процессов; *Рельеф аккумулятивно-денудационной группы*: 2. Грядово-волнистые равнины на отпрепарированных породах кристаллического субстрата, осложнённые аккумулятивными возвышенностями ледниковой природы; 3. Холмисто-

увалистые равнины ледниковые и ледниково-озерные равнины на моренном субстрате (зоны краевых образований). *Рельеф аккумулятивной группы*: 4. Выровненные, местами всхолмленные, озерные нефелоидные равнины; 5. Субгоризонтальные выположенные ледниково-озерные равнины; 6. Ундалювиальные, слабо наклоненные равнины; 7. Изобаты, м

Благодаря описанию состава четвертичных отложений, слагающих дно котловин Ладожского и Онежского озер, их характеристике и взаиморасположения, а также форм рельефа, сложенных ими, эта и предыдущая глава соответствуют 1 и 2 защищаемым положениям.

### **Сравнение геоморфологических характеристик и четвертичного покрова котловин Ладожского и Онежского озёр**

Общие черты геоморфологического строения Ладожской и Онежской котловин заключаются, в первую очередь, в большей расчленённости рельефа в северной части, и меньшей в южной. Однако, рельеф дна Онежского озера в общем плане изометричнее, чем Ладожского. По результатам анализа данных о рельефе Ладожской котловины было выделено 9 типов поверхности, а для Онежской было выделено 6 типов (Методическое руководство..., 2009) Северная часть обоих озёр занята интенсивно расчленёнными грядовыми и грядово-увалистыми равнинами, развитыми на кристаллических породах архей-протерозойского возраста. Данные типы характеризуются резкими перепадами высот, за счёт изобилия гряд, чередующихся с аккумулятивными бассейнами. Гряды и аккумулятивные бассейны зачастую являются структурно предопределёнными. На дне Онежского озера к данному типу с юга примыкают аккумулятивные нефелоидные и лимногляциальные равнины, в то время, как в пределах Ладожской котловины, данный тип переходит в грядово-увалистые структурно-денудационные равнины, развитые на верхнепротерозойских породах, распространены на большей части севера Ладожской котловины. В пределах Онежского озера, данный тип занимает области у западного и восточного берега. Центр дна Онежского озера занят аккумулятивной волнистой озёрной равниной. Схожий тип поверхности на дне Ладожского озера выделяется в северной части, где глубины более 100 м, в районе острова Лункулансаари на северо-востоке, и у восточного берега, в устьях рек Тулокса и Видлица. Центральная часть котловины Ладожского озера занята холмисто-увалистой равниной, в пределах которой находятся гряды, являющиеся краевыми образованиями вепсовской стадии валдайского оледенения по данным (Максимов и др., 2015). В пределах котловины Онежского озера, край вепсовской стадии проводится на севере, в заливах Большое, Малое Онего, и Повенецкий (Максимов и др., 2015; Демидов, 2005). От центра до юга озёрной котловины, вдоль берега, и отчленённая зоной холмисто-увалистого рельефа с востока, в Онежском озере протягивается зона плосковолнистых ледниково-озёрных равнин и террас. В Ладожской котловине, данный тип занимает большую часть южной области, отчленённый лишь у побережья зонами краевых ледниковых образований, а также зонами ундалювиальной и озёрно-аллювиальной аккумуляции. В случае обеих котловин, данный тип характеризуется почти полным отсутствием современных озёрных осадков, вероятно, из-за современных гидродинамических процессов. Юг Онежского озера отличается от юга Ладожского наличием пологоволнистой зоны нефелоидной аккумуляции, а также всхолмленной аккумулятивно-денудационной ледниковой равнины. Последний характеризуется сравнительно небольшими глубинами и наличием поднятий ледникового генезиса. По данным ГК-1000/3 (Максимов и др., 2015) данный тип рельефа выделен также в северо-восточной части Ладоги. Упомянутыми авторами отнесена к нему и возвышенность, входящая в зону холмисто-увалистых, ледниковых и ледниково-озерных равнин на моренном субстрате и краевых ледниковых образований.

*Сравнение особенностей геологического разреза четвертичных отложений.*

Продольный разрез четвертичных отложений Ладожского озера (рис. 10) построен по результатам интерпретации данных НСП, проведенного в 2014-2015 гг. Северная часть более глубокая, преобладающий рельеф – структурно-денудационный. Мощность отложений InH значительно выше, чем в южной части. Понижения между подводными возвышенностями зачастую заняты седиментационными бассейнами. По данным НСП, все возвышенности сложены отложениями (gIIIos) и (fIIIos). В центральной части степень расчленённости рельефа

уменьшается, появляются возвышенности, сложенные, предположительно, отложениями (fIIIos). Однако группа исследователей, работающих по российско-германскому проекту PLOT полагают, что данные отложения относятся не к флювиогляциаламосташковского возраста, а к микулинским отложениям, на основании OSL-датирования (Gromig et al., 2019). В центре озера мощность отложений (InH) становится меньше, местами на поверхность выходят лимногляциальные отложения (IgIIIos). В южной же части, отложения InH практически пропадают, что вероятно является следствием гидродинамических условий, препятствующих отложению илов, рельеф выположенный, на поверхность выходят отложения (IgIIIos). В плане макрорельефа, для котловины Ладожского озера характерна определённая асимметрия в продольном сечении, выраженная в достаточно резкой смене глубин в северной части и плавной в южной.

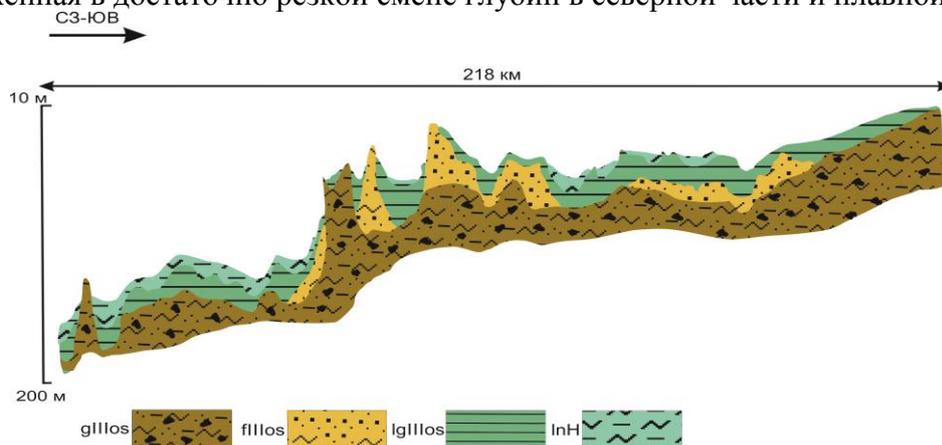


Рис. 10. Продольный разрез четвертичных отложений Ладожского озера, построенный по результатам полевых работ.

Продольный разрез четвертичных отложений, слагающих дно котловины Онежского озера (рис. 11), построен по результатам совмещения материалов полевых работ с данными о строении рельефа по результатам анализа GRID-модели и данными (Макарьев, 2002). Разрез проходит из Петрозаводской губы до залива Южное Онего. Петрозаводская губа по большей части покрыта чехлом отложений (InH). Лишь ближе к выходу их мощность уменьшается, вплоть до выхода на поверхность отложений (IgIIIos). Также в средней части губы наблюдается гряда, вероятно, флювиогляциального генезиса, что подтверждается данными геофизических исследований 2016 года и данными бурения 2019 года (Беляев и др., 2021). В средней части на поверхность выходят отложения (gIIIos, fIIIos и IgIIIos), спорадически перекрытые отложениями (InH). В южной части, почти вся поверхность котловины, в пределах залива Южное Онего, заполнена отложениями (InH). Выходы отложений (gIIIos) находятся лишь у выхода из залива. Продольный профиль котловины Онежского озера гораздо более изометричен, чем у Ладожского озера, но общая тенденция к изменению глубины в уменьшении ее к югу достаточно схожа с котловиной Ладожского озера, за тем лишь различием, что наиболее углублённой в Онежском озере является центральная часть.

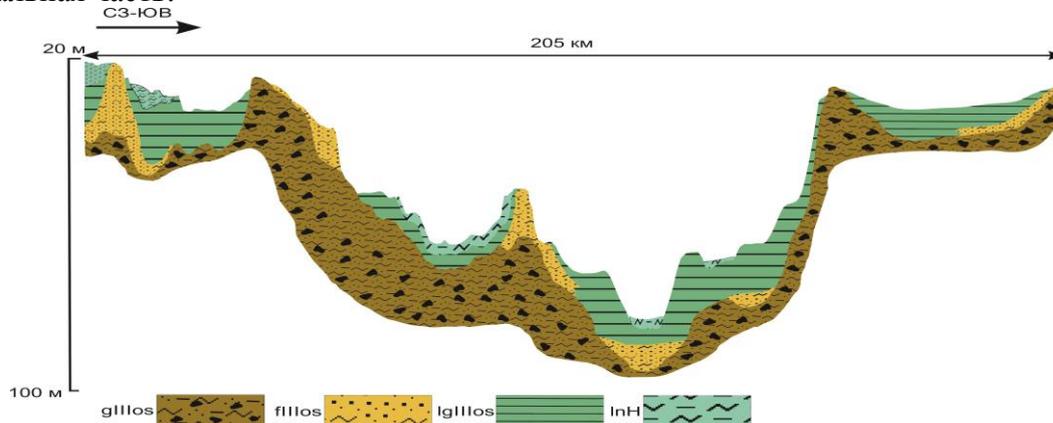


Рис. 11. Продольный разрез четвертичных отложений Онежского озера, построенный по результатам полевых работ.

Сходство изучаемых котловин – в составе слагающих их четвертичных отложений,

представляющих единый гляциоседиментационный цикл, большую степень расчленения рельефа в северной части и меньшую в южной, а также тенденцию к глубинам в открытой части гораздо меньшим для юга, чем для севера. Различия в гораздо большей степени расчленения Ладужской котловины, чем Онежской; Глубина Ладужского озера более плавно сменяется от севера к югу, чем глубина Онежского; продольная асимметрия котловины Ладужского озера и квазиизометричность котловины Онежского; Отсутствие, либо малая мощность отложений lnH в Ладужском озере характерна для юга, а для Онежского озера, характерна также и для центральной и южной части, что в обоих случаях, связано с гидродинамическими, либо геоморфологическими условиями.

#### **Выводы:**

1. Отложения верхнеплейстоцен-голоценового чехла котловин обоих озёр формируют единый гляциоседиментационный цикл со следующей последовательностью отложений: Морены (gШos) - Флювиогляциальные отложения (fШos) - три пачки лимногляциальных отложений (lg<sub>1</sub>Шos, lg<sub>2</sub>Шos, lg<sub>3</sub>Шos) - современные озёрные отложения (lnH).

2. Несмотря на сходство в строении отложений, покрывающих дно котловин изучаемых озёр, существуют различия в вещественном составе: отложения Ладужского озера более песчанисты; флювиогляциальные отложения в пределах Ладужской котловины развиты в меньшей степени, нежели в пределах Онежской котловины, при описании отложений Ладужского озера не замечено упоминаний о присутствии аутигенных минералов, в то время, как в отложениях Онежского озера они встречаются почти повсеместно.

3. Тектурные особенности различных типов отложений является индикатором господствовавших во время их формирования условий. Например, характер слоистости лимногляциальных отложений может служить индикатором положения края ледника во время их формирования. Таким образом, преобладание более грубых слоев является индикатором близости края ледника, а при удалении ледника толщина слоев уменьшается, вплоть до гомогенизации осадка. Помимо текстурных особенностей, индикаторами палеоклиматической обстановки могут служить включения органики или аутигенных минералов (гидроокислов железа и марганца).

4. Полученные по отложениям Ладужского озера (Lebas et al., 2020) и Онежского озера (Savelieva et al., 2018; Kiskina et al., 2018; Subetto et al., 2020) датировки позволяют предположить, что установление типичных озёрных условий, близких к современным, произошло в Ладужском озере в пребореальном, а в Онежском озере - в атлантическом периоде голоцена.

5. Наиболее заметные в продольном профиле изменчивость рельефа и характер залегания верхнеплейстоцен-голоценовых отложений имеют ряд существенных различий для котловин Ладужского и Онежского озёр. Например, в случае Ладужского озера наиболее углублённой является северная часть, а для Онежского – центральная, что очевидно, предопределено геологической структурой дочетвертичных пород. Наибольшая мощность четвертичных отложений для Ладужского озера характерна в северной части, а для Онежского, помимо северной, также и для центральной. Однако в случае обоих изучаемых озёр – наименьшая мощность озёрных отложений характерна для южной части.

#### **Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ**

1. Беляев П. Ю., Рыбалко А. Е., Субетто Д. А. Геоморфология котловины Ладужского озера. Новые данные. // Астраханский вестник экологического образования. 2020. Номер: 5 (59) . с. 142-154. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44159852>
2. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Зобков М.Б., Фёдоров Г.Б. Четвертичные отложения и рельеф Онежского озера // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. №1(56). С. 6–16. doi 10.17072/2079-

**Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, включенных в базы Scopus, Web of Science**

Dmitry Subetto, Alexandr Rybalko, Natalia Belkina, Vera Strakhovenko, Mikhail Tokarev, Maksim Potakhin, Mikhail Aleshin, Pavel Belyaev, Nathalie Dubois, Vladislav Kuznetsov, Dmitry Korost, Andrei Loktev, Natalia Shalaeva, Alexandra Kiskina, Natalia Kostromina, Yury Kublitskiy and Alexander Orlov. Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia) // Minerals 2020. vol. 10. 20 pp. <https://doi.org/10.3390/min10110964>

**Список других публикаций по теме исследования**

1. Беляев П.Ю. Особенности строения четвертичных отложений северной части котловины Онежского озера. (*Тезисы доклада научной конференции*). Водные ресурсы: изучение и управление (школа-практика). Материалы VI международной конференции молодых учёных. Петрозаводск – КарНЦ РАН, 2020. С. 135-138.
2. Беляев П.Ю. Рельеф и четвертичные отложения ладожского озера по результатам многоканального сейсмоакустического профилирования в 2014 -2015 гг. (*Тезисы доклада научной конференции*). Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10-14 апреля 2017, с. 445-446.
3. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А. Новая геоморфологическая схема Ладожского озера и перспективы её применения в палеогеографических исследованиях // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, Москва, 28 сентября-1 октября 2020 г. [Электронное издание] — М.: Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020 — С. 269-275.
4. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е. Новые данные о строении четвертичных отложений Ладожского и Онежского озера (*Тезисы доклада научной конференции*). Труды VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)” Том II: Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2019. с. 201-204.
5. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е. Строение верхнеплейстоцен-голоценовых отложений Заонежского зал. (Онежское оз.) по результатам полевых работ 2019 года (*Тезисы доклада научной конференции*). Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. Выпуск 6. Санкт-Петербург. 2019 doi:10.24411/2687-1092-2019-10636, с.250-253.
6. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Зобков М.Б. Новые данные о рельефе котловины Онежского озера. // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Выпуск 7. 2020 doi:10.24411/2687-1092-2020-10744
7. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Зобков М.Б. Разрез верхнеплейстоцен-голоценовых отложений Онежского озера. // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)» Том III (III): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020, с 397-399.: ISBN 978-5-6045536-3-3. <https://www.maresedu.com/materials>
8. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Алешин М.И. Результаты работ по изучению верхнеплейстоцен-голоценового чехла котловины Онежского озера. Обобщение данных за период 2016-2019 гг. (*Тезисы доклада научной конференции*). Труды VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)» Том II(III): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020, с.41-43.
9. Егорова Н.В., Рыбалко А.Е., Беляев П.Ю., Сакулина Т.С., Токарев М.Ю. Итоги комплексных геолого-геофизических исследований на акватории Ладоги за 2014 - 2015 годы. (*Тезисы доклада научной конференции*). Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10-14 апреля 2017 г. Москва: ИО РАН. С.465-466.

10. Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А., Алешин М.И., Беляев П.Ю., Гайнанов В.Г., Токарев А.М., Балакин И.С. Геодинамические и неотектонические процессы в Ладожском и Онежском озерах по данным сейсмоакустических исследований (*Тезисы доклада научной конференции*). Труды VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)” Том II: Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2019. с. 32-36
11. Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Токарев М.Ю., Беляев П.Ю., Барымова А.А., Федоров Г.Б., Корост С.Р. Эволюция осадконакопления в позднечетвертичное время во внутренних морских бассейнах и крупных озерах в гляциальной зоне вдоль восточной периферии Балтийского кристаллического щита (*Тезисы доклада научной конференции*). Мат-лы IX Всероссийского литологического совещания (с международным участием) (Казань, 30 сентября– 3 октября 2019 г.). Казань: Издательство Казанского университета, 2019. с. 392-393.
12. Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А., Алешин М.И., Беляев П.Ю., Савельева Л.А., Кузнецов В.Ю. Использование сейсмоакустических методов при изучении крупных озер для решения стратиграфических, палеогеографических и геоэкологических задач. (*Тезисы доклада научной конференции*). Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Мат-лы II Международной Конф. (19-24 мая 2019). Казань: Изд-во АН РТ, 2019, ч.1. с.314-318.
13. Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Корост Д.В., Субетто Д.А., Алешин М.И., Беляев П.Ю. Новые данные о строении Онежского озера по данным геолого-геофизических исследований в 2016-2017 годах. (*Тезисы доклада научной конференции*). Труды VI Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2017)” Тверь: ООО "ПолиПРЕСС", 2017. с. 254-257
14. 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) (*Тезисы доклада научной конференции*). Труды VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)” Том II: Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2019. с. 93-97.
15. Рыбалко А. Е., Токарев М. Ю., Субетто Д. А., Беляев П. Ю., Белкина Н. А., Страховенко В. Д., Полудеткина Е. Д., Корост С. Р., Алешин М. Ю., Миринец А. К., Кузнецов В. Ю., Савельева Л. А. Карта четвертичных отложений Онежского озера: результаты. Комплексных геолого-геофизических работ в 2016-2019 гг. Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)» Том III (III): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020, 517 с.: ISBN 978-5-6045536-3-3.  
<https://www.maresedu.com/materials>
16. Субетто Д.А., Токарев М.Ю., Беляев П.Ю., Барымова А.А., Федоров Г.Б., Белкина Н.А. Палеогеография озерных и морских бассейнов восточной периферии Балтийского кристаллического щита в позднем неоплейстоцене и голоцене – итоги работ по программе в 2019 году. (*Тезисы доклада научной конференции*). Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. Выпуск 6. Санкт-Петербург. 2019. doi:10.24411/2687-1092-2019-10635, с. 242-249
17. Субетто Д.А., Федоров Г.Б., Токарев М.Ю., Белкина Н.А., Страховенко В.Д., Беляев П.Ю., Гурбич В.А., Белов М.О., Корост С.Р., Потахин М.С., Кискина А.Р., Барымова А.А., Кублицкий Ю.А. Первый опыт инженерно-геологического бурения в Онежском озере. (*Тезисы доклада научной конференции*). Труды VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)» Том II(III): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020, с.94– 97.
18. 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 № 4 с.515-517  
<http://limnolwbiol.com/index.php/LFWB/article/view/475>.

19. Orlov A.V., Subetto D.A., Potakhin M.S., Beliaev P.Yu. Runoff of Onega paleo-lake in late-glacial period: paleolimnological data *Limnology and Freshwater Biology* 2020 (4): 469 <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-469>
20. Rybalko A. E., Tokarev M.Yu., Subetto D.A., Aleshin M.I., Belyaev P. Yu. Methods of conducting complex studies to restore the paleolimnological conditions and underwater landscapes of large lakes by the example of Petrozavodsk Bay of Lake Onega. (*Тезисы доклада научной конференции*). Paleolimnology of Northern Eurasia: experience, methodology, Status and young scientist school in microscopy skills in Paleolimnology: proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference (Kasan, Republic of Tatarstan, Russia, 1-4<sup>th</sup> of October, 2018) /Kasan: Kasan University, 2018/, с. 98-100.
21. Rybalko A., Tokarev M., Aleshin M., Subetto D., Belyaev P. New data on the structure on Quaternary sediments and modern geodynamic movements in Lake Ladoga. (*Тезисы доклада научной конференции*). INQUA Peribaltic Working Group Meeting and Excursion 2018 International Scientific Conference and School for Young Scientist, 19-25 August 2018: Excursion and Abstracts/ Karelian RC of RAS, Petrozavodsk, 2018 с.101-102
22. 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 № 4 с.524-526 <http://limnol.fwbiol.com/index.php/LFWB/article/view/479>
23. Subetto, D.\*; Belkina, N.; Strakhovenko, V.; Rybalko, A.; Zobkov, M.; Potakhin, M.; Borodulina, G.; Gurbich, V.; Kublitskii, Yu. Kiskina, A.; Ovdina, E.; Fedorov, G.; Hang, T.; Korost, S.; Belayev, P.; Belov, M. and Barymova, A. Sedimentary environments in Lake Onega: from Late Glacial to modern conditions. (*Тезисы доклада научной конференции*). Field Symposium of the INQUA PeriBaltic Working Group "From Weichselian Ice-Sheet Dynamics to Holocene Land Use Development in Western Pomerania and Mecklenburg". 2019. Abstract Volume. Scientific Technical Report STR 19/01, Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences. p. 109-110.

#### **Прочие опубликованные труды:**

1. Рыбалко А.Е., Захаров М.С., Локтев А.С., Иванова В.В., Исаева О.В., Мотычко В.В., Карташев А.О., Беляев П.Ю. Новая инженерно-геологическая карта шельфа арктических морей России // *Neftegaz.ru offshore* 2020 т.97, № 1, с. 44-51. ISSN 2410-3837
2. Рыбалко А.Е., Захаров М.С., Щербаков В.А., Локтев А.С., Иванова В.В., Беляев П.Ю. Геоморфологические аспекты формирования инженерно-геологических особенностей четвертичного покрова арктического шельфа России. // VIII Шукинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, Москва, 28 сентября-1 октября 2020 г. [Электронное издание] — М.: Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020 — С. 111-116.
3. Рыбалко А.Е., Щербаков В.А., Токарев М.Ю., Маев П.А., Сличенков В.И., Алексеев А.Ю., Беляев П.Ю. Новые данные по строению четвертичного покрова залива Петра Великого (по материалам сейсмоакустического профилирования 2018 года) (*Тезисы доклада научной конференции*). Труды VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)” Том II: Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2019. с. 170-172.
4. Belyaev P., Rybalko A. Bioherms of Peter the Great Bay. Distribution and prospects of study. (*Тезисы доклада научной конференции*) Annual conference “GeoHab 2019 – Marine Geological and Biological Habitat Mapping”: Abstracts (May 13–17, 2019, St. Petersburg, Russia). –SPb.: VSEGEI Press, 2019 p.17.
5. А.Е. Рыбалко, В.А. Шчербаков, В.В. Половков, Н.Ю. Бобров, Р.Ю. Беляев, А.Ю. Алексеев, И.В. Федорова. Experience in a Complex Study of Small Lakes in the City to Assess their Environmental Status and Anthropogenic Pollution. // «Инженерная и рудная геофизика 2020» — Пермь, Россия, 12-16 мая 2020 г. (**Scopus**)